

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА



НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
Института проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН  
и Физического факультета МГУ  
имени М.В. Ломоносова  
«ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСРЕДАХ»



ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
В ГЕОСРЕДАХ**

МОСКВА, ИПМЕХ РАН, 21-23 ОКТЯБРЯ 2020

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

SIXTH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE-SCHOOL  
FOR YOUNG SCIENTISTS

**PHYSICAL AND MATHEMATICAL  
MODELING OF PROCESSES  
IN GEOMEDIA**

MOSCOW, IPMECH RAS, OCTOBER 21-23, 2020

PROCEEDINGS

МОСКВА 2020

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8

ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

Ф 50

**Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах:**

Ф 50 Шестая международная научная конференция-школа молодых ученых; Москва, 21-23 октября 2020 г., Сборник материалов. – М.: ИПМех РАН, 2020. – 272 с.

ISBN 978-5-91741-253-5

В сборнике материалов представлены доклады участников 6-й Международной научной конференции-школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» в виде коротких статей. Тематика Школы охватывает широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований процессов во всех природных средах: в недрах Земли, океане, атмосфере. Центральное место в работе Школы занимают вопросы, связанные с разработкой месторождений углеводородного сырья. Большое внимание уделено исследованию течений в сложных неоднородных жидкостях, экологическим проблемам, изучению антропогенного вклада в динамику природных систем.

*Ключевые слова:* процессы в геосредах, математическое и лабораторное моделирование, нефтяные и газовые месторождения, неоднородные жидкости, течения в сложных средах.

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8  
ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

**Physical and Mathematical Modeling of Processes in Geomedia:**

6th International Scientific School of Young Scientists; Moscow, October 21-23, 2020, proceedings. – Moscow: IPMech RAS, 2020. – 272 p.

The book presents short papers of participants of the 6-th International Scientific Conference-School for Young Scientists «Physical and Mathematical Modeling of Processes in Geomedia». The Conference focuses on results of the Basic Research Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences P8 "Deposits of strategic raw materials in Russia: innovative approaches to forecasting, evaluation and production. Oil from the deep horizons of sedimentary basins as a source of replenishment of the resource base of hydrocarbons: theoretical and applied aspects", as well as fundamental and applied problems in the natural and technical systems.

*Key words:* processes in geo-media, mathematical and laboratory modelling, oil and gas production, inhomogeneous fluids, fluxes in complex media.

ISBN 978-5-91741-253-5



9 785917 412535

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, 2020



## **ОРГАНИЗАТОРЫ ШКОЛЫ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

### **ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ШКОЛЫ:**

теоретические и экспериментальные исследования процессов в атмосфере, океане, литосфере, их взаимодействия;

широкий круг проблем, связанных с добычей углеводородного сырья;

экологические проблемы окружающей среды;

проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду;

методы геофизических исследований.

### **СПОНСОРЫ**

Российский фонд фундаментальных исследований Грант № 20-01-22012.

### **ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**

Председатель – академик Д.М. Климов (ИПМех РАН), заместитель председателя – д.т.н. В.И. Карев (ИПМех РАН), заместитель председателя – профессор К.В. Показеев (МГУ), ученый секретарь – к.ф.м.н. Т.О. Чаплина (ИПМех РАН), профессор Л.А. Абукова (ИПНГ РАН), А.В. Бабанин (Технологический Университет Суинберн, Австралия), академик НАН Армении В.Н.Акопян (Институт механики Национальной академии наук, Армения), д.ф.-м.н. Н.С. Безаева (МГУ имени М.В. Ломоносова), Д-р Алексис Вискайно (Спрингер, Германия), Д-р Йен Грэй (Сигра, Австралия), академик И.Г.Горячева (ИПМех РАН), академик А.Н. Дмитриевский (ИПНГ РАН), чл.-корр.РАН П.О. Завьялов (ИО РАН), профессор А.С. Запелалов (МГИ РАН), профессор А.Г. Зацепин (ИО РАН), профессор И.А.Знаменская (МГУ), профессор В.Н. Зырянов (ИВП РАН), профессор К. Коорнхоф (Университет Претории, ЮАР), д.ф.-м.н. А.В. Кистович (ВНИИФТРИ), д.ф.-м.н. Ю.Ф. Коваленко (ИПМех РАН), профессор Б.В. Лапшин (МГУ, ИПГ Росгидромета), профессор В.М. Максимов (ИПНГ РАН), академик В.П. Матвеев (ИМСС УРО РАН), профессор Л.А.Назарова (ИГД СО РАН), академик Р.И. Нигматулин (ИО РАН), профессор В.Н. Носов (ГЕОХИ РАН), профессор РАН И.А.Репина (ИФА РАН), профессор А. Саакян (Институт механики Национальной академии наук, Армения), профессор А.А. Соловьев (МГУ), профессор Б.Г.Тарасов (Университет Западной Австралии), профессор В.В. Фадеев (МГУ), чл.-корр. РАН Н.Н. Филатов (ИВПС КарНЦ РАН), профессор А.А.Шрейдер (ИО РАН), д.ф.-м.н. С.Е. Якуш (ИПМех РАН), профессор П. Янг (Университет Торонто, Канада).

*Статьи в сборнике опубликованы в соответствии с материалами, предоставленными авторами, ответственность за достоверность и авторство содержания полностью лежит на авторах.*

### **МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ШКОЛЫ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1



## ORGANIZERS OF THE SCHOOL

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

Faculty of Physics of M.V. Lomonosov Moscow State University

### SCIENTIFIC PROGRAM TOPICS:

theoretical and experimental studies of processes in the atmosphere, ocean, lithosphere and their interactions;

wide range of problems associated with hydrocarbon production;

ecological problems of the environment;

problems of human impact on the environment;

methods of geophysical research.

### SPONSORS

Russian Foundation for Basic Research Grant No. 20-01-22012.

### PROGRAM COMMITTEE

Chairman – academician D.M. Klimov (IPMech RAS), deputy chair – professor V.I. Karev (IPMech RAS), deputy chair – professor K.V. Pokazeev (MSU), scientific secretary – PhD T.O. Chaplina (IPMech RAS), professor L.A. Abukova (OGRI RAS), A.V. Babanin (Swinburn University Of Technology, Australia), academician NAS of the Republic of Armenia V.N. Hakobyan (Institute of Mechanics, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia), Alexis Vizcaino (Springer, Germany), Ian Gray (Sigra, Australia) academician I.G. Goryacheva (Ipmech RAS), academician A.N. Dmitrievsky (IPNG RAS), corr. RAS P.O. Zavyalov (IO RAS), professor A.S. Zapevalov (MGI RAS), professor A.G. Zatsepin (IO RAS), professor I. A.Znamenskaya (MSU), professor V.N. Zyryanov (IVP RAS), professor K. Koornhof (University of Pretoria, South Africa), professor A.V. Kistovich (VNIIFTRI), professor Yu. F. Kovalenko (IPMeh RAS), professor B.V. Lapshin (MSU, IPG Roshydromet), professor V.M. Maksimov (IPNG RAS), academician V.P. Matveenko (IMSS URO RAS), professor L.A. Nazarova (IGD SB RAS), academician R.I. Nigmatulin (IO RAS), professor V.N. Nosov (GEOHI RAS), professor I.A. Repina (IFA RAS), professor A. Sahakyan (Institute of mechanics of the National Academy of Sciences, Armenia), professor A.A. Soloviev (MSU), professor B.G. Tarasov (University of Western Australia), professor V.V. Fadeev (MSU), corr. RAS N.N. Filatov (IVPS KarSC RAS), professor A.A. Schreider (IO RAS), professor S.E. Yakush (IPMeh RAS), professor P. Young (University Of Toronto, Canada).

*Articles in the book are published in accordance with the materials provided by the authors, the responsibility for the accuracy and authorship of the content is completely assigned to the authors.*

### SCHOOL VENUE

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

119526, Russia, Moscow, Vernadskogo avenue, 101-1

## ПРЕДИСЛОВИЕ

6-я Международная конференция - школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» в шестой раз проводится в Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук. Этот молодежный научный форум проводится на регулярной основе и вызывает большой интерес в научном сообществе. Значительно расширилась география участников: ныне она охватывает всю страну от Калининграда до Камчатки и Сахалина, от Санкт-Петербурга до Севастополя.

Первые пять Школ молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» успешно прошли в ИПМех РАН в 2015, 2016, 2017, 2018 и 2019 г. Они собирали каждая более 100 участников, две трети из которых составили молодые ученые и специалисты. Все доклады сопровождались активными обсуждениями и широкой дискуссией, которая продолжалась и после окончания программных заседаний. По окончании работы 2-ой Школы было принято решение о целесообразности издания полных текстов наиболее интересных докладов, представленных на Школе. Они были опубликованы в научном журнале «Процессы в геосредах», №4, 2016. Труды 3-ей, 4-ой и 5-ой Международных научных школ молодых ученых "Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах" изданы в виде сборников научных статей издательством «Springer» с индексацией их в международных базах данных Scopus и WoS.

Проведение 6-ой Международной конференции- школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» ориентировано на привлечение внимания молодых ученых, как приступивших к самостоятельной работе, так и начинающих – студентов старших курсов и аспирантов, к теоретическим и прикладным аспектам проблем, возникающих при изучении природных процессов в различных геосредах, взаимовлияния техногенной деятельности и окружающей среды. Наиболее перспективными направлениями исследований были признаны следующие: развитие геомеханического подхода к решению проблем нефтегазодобычи; физическое и математическое моделирование процессов деформирования и разрушения горных пород и изучение их взаимовлияния на фильтрацию; создание эффективных математических моделей и экспериментальной базы для исследования течений в сложных неоднородных жидкостях, экологические проблемы, изучение антропогенного вклада в динамику природных систем.

Исследования процессов в различных природных средах: литосфере, гидросфере, атмосфере их взаимовлияния, техногенного вклада в их протекание - являются чрезвычайно актуальными и во многом нерешенными задачами естествознания. В современных условиях, когда крупные и доступные месторождения истощаются, все большую остроту приобретает проблема расширения ресурсной базы углеводородного сырья. Особенно это важно для нашей страны, имеющей потребность в больших объемах энергоресурсов, традиционно занимающей ведущие позиции в мире по нефтегазодобыче и получающей серьезные поступления в бюджет от экспорта нефти и газа. Новыми источниками могут быть нефть и газ из низкопроницаемых залежей, нефть баженовских и абалакских отложений, углеводороды Арктики, газогидраты, глубокие и сверхглубокие месторождения нефти и газа. По мнению многих специалистов именно нефть и газ из низкопроницаемых коллекторов, ранее не разрабатываемых может стать наиболее перспективным источником расширения

ресурсной базы углеводородного сырья. Для их освоения требуется создание новых эффективных низкзатратных экологически чистых технологий. Ученые, занимающиеся изучением процессов в геосредах, могут и должны направить свои усилия на создание научного фундамента таких технологий. Развитие новых прорывных подходов к разработке месторождений углеводородного сырья очень важно в современных геополитических условиях и требует привлечения умов и сил молодых ученых с их энтузиазмом, напористостью и нестандартным видением задач и путей их решения. Эффективным инструментом для обмена информацией и организации междисциплинарных исследований процессов в геосредах могут стать международные мероприятия, в том числе молодежные научные школы.

На 6-ю Конференцию-школу представлено значительное число докладов, посвященных моделированию процессов в сложных геодинамических системах, в том числе в связи с проблемами нефтегазодобычи. Увеличилось число докладов, посвященных экологическим проблемам.

К участию в Конференции-школе приглашаются ученые всех специализаций: экспериментаторы, аналитики и вычислители. Известными специалистами будут прочитаны лекции в ключевых разделах механики, физики, геофизики. Предполагаются доклады молодых ученых, выполнивших глубокие оригинальные исследования. Программным комитетом, куда вошли ведущие ученые по научным направлениям Конференции-школы, было проведено рецензирование поступивших на школу докладов и произведен конкурсный отбор. К началу работы Конференции-школы издан сборник материалов докладов, отобранных на Конференцию-школу. По окончании ее работы наиболее интересные доклады, представленные на английском языке, в виде статей будут опубликованы издательством Springer в серии Geo Sciences Conference Proceedings. Также часть докладов будет опубликована в виде научных статей в журнале «Процессы в геосредах».

Школа организована при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований Грант № 20-01-22012.

Организаторы конференции глубоко благодарны признанным ученым, давшим согласие принять участие в ее работе, молодым специалистам аспирантам и студентам, откликнувшимся на приглашение, и, конечно, учреждениям, оказавшим Конференции-школе организационную поддержку и финансовую поддержку.

Председатель Программного комитета  
академик Д.М. Климов

Председатель Оргкомитета  
профессор В.И. Карев

Зам. Председателя Оргкомитета  
профессор К.В. Показеев

## PREFACE

The Sixth International Scientific Conference-School for Young Scientists "Physical and mathematical modeling of processes in geomedia" is held at the Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences for the sixth time and is of great interest in the scientific community. For the sixth year in a row more than one hundred scientists have taken part in it, two thirds of whom are young researchers.

At the five previous Schools, participants' reports were traditionally accompanied by active discussion which lasted beyond the end of the program sessions. As a result of the work of the School, it was decided to hold the 6th Conference-Scientific School of Young Scientists "Physical and mathematical modeling of processes in geomedia" in 2020. The most promising areas of research were recognized following ones: the development of a geomechanical approach to solving the problems of oil and gas production, physical and mathematical modeling of deformation and fracture of solid media and study of their interaction on the seepage, creation of effective mathematical models and experimental base for research of flows in complex heterogeneous liquids, environmental issues, the study of the anthropogenic contribution to the dynamics of natural systems.

The 6th Youth Forum, as well as the previous four, has to contribute to the solution of fundamental scientific problems arising in the study of natural processes in different geomedia, the impact of anthropogenic activities and the environment. The scientific program of the Conference-School includes: theoretical and experimental studies of processes in the atmosphere, oceans, the lithosphere and their interaction; environmental issues; problems of human impact on the environment; methods of geophysical research. One of the central topics for the Conference-School is associated with the elaboration of scientific bases, the creation of new breakthrough approaches to the development of hydrocarbon deposits, including non-traditional sources.

Research of the dynamics of natural systems - the geosphere, the hydrosphere, the atmosphere - and their interactions, the human contribution to naturally occurring processes are among the most urgent and practically important scientific problems. Intensive development of research in these areas is due to several factors. The widespread introduction of computer technology has allowed beginning calculation of complex phenomena, previously unavailable for analysis. Creation and improvement of a new generation of geophysical instruments, remote observing systems based on the ship, aircraft, and satellite allowed us to obtain a large amount of data to objectively reflect the picture of the processes.

An alternative to the use of hydrocarbons as a main source of energy on the planet in the coming decades is unlikely to be found. At the same time, the resource base of hydrocarbons is quickly depleted, new non-traditional sources are required. Among them, oil and gas of low-permeability deposits, oil of Bazhenov and Abalak formations, hydrocarbons of the Arctic region, gas hydrates, deep and ultra-deep oil and gas deposits. Oil and gas of low-permeability deposits previously not developed may be the most promising source of expanding the resource base of hydrocarbons according to many experts. The creation of new breakthrough approaches to the development of hydrocarbon fields is very important in today's geopolitical conditions, and requires the involvement of young minds and strength. International activities, including the youth scientific schools can become an effective tool for exchange of information and the organizing of interdisciplinary research of processes in geomedia.

Scientists of all specialties are invited to participate in the Conference-School:

experimenters, analysts and computer specialists. The lectures of prominent experts will be given in key sections of geomechanics and physics. Reports of young scientists who have made a deep original research are expected. Program Committee, which includes the leading scientists on the scientific directions of the Conference-School, has conducted peer review of the reports submitted to the Conference-School and produced a competitive selection. This book presents a collection of reports selected to the Conference-School. Upon completion of the Conference-School, the most interesting reports presented in English will be published by Springer in the Geosciences Conference Proceedings Series. Also part of the reports will be published as scientific papers in the journal "Processes in Geomechanics".

The Conference-School is organized with the support of the Russian Foundation for Basic Research Grant No. 20-01-22012.

The Conference organizers are deeply grateful recognized scientists who have given consent to take part in its work, young professionals and post-graduate students who have responded to the invitation, and, of course, the institutions which have provided financial and organizational support to the Conference-School.

Chairman of the Program Committee Academician D.M. Klimov

Chairman of the Organizing Committee Professor V.I. Karev

Dep. Chairman of the Organizing Committee Professor K.V. Pokazeev



# MANY-YEAR VARIABILITY OF THE LAKES LADOGA AND ONEGO ICE REGIME BASED ON REMOTE SENSING AND IN SITU DATA

*V.N. Baklagin*

*Northern Water Problems Institute KarRC RAS, Petrozavodsk, slava.baklagin@mail.ru*

The purpose of our study was to calculate the basic statistical characteristics for Lakes Ladoga and Onego, which include the dates and durations of both ice phenomena.

The timing and duration of the ice phases (freeze-up, complete ice, and break-up) and the ice-free period and mean ice concentration were estimated by using time series of airborne surveys and from satellite imagery. The mean ice concentration is a sensitive indicator of the local climate and is defined as a fractional area covered by ice. The techniques for carrying out airborne surveys and data analysis for Lakes Ladoga and Onego are described by [1]. In our work we used approaches proposed by Leppäranta [2] to estimate the mean annual ice concentration from airborne ice surveys (1956 to 1989) for both Lakes Ladoga and Onego. For this work, satellite remote sensing data were collected daily data during the period 2006-2017 from NOAA NESDIS. These data were corrected by the Terra MODIS and Aqua MODIS sensors (in the visible range with a spatial resolution 500 m. The principal advantage of our approach is the use of daily satellite data, in contrast to the approach employed in [3], which used only 20 to 30 images/yr. We use MODIS synthesized images as RGB-images (channels 1, 4, 3 [9]) for the period 2006 to 2017 for the classification or automated separation of pixels obtained from the satellites into groups corresponding to 'water', 'ice', 'land', and 'snow' [4]. A standard method of spectral features was applied, based on differences in spectral brightness [5]. But in this case we apply RGB pictures. The selection of the spatial grid resolution matched the spatial resolution of satellite images, i.e. 500 m. The error of our approach is less than 1%. We have developed an automated algorithm for ice data processing for Lakes Ladoga and Onego. This algorithm includes a combined classification of spectral brightness differences and the "flood" and "right hand" methods of Von Neumann [6]. The automated algorithm enables per-pixel analysis to be run without human involvement, in contrast to the studies in [3], where the authors divided the lake surface area down into 10x10 km<sup>2</sup>, and visually estimated ice extent (if a square contained more ice than open water, the square was classified as totally ice-covered, and vice versa). It is obvious that the error of estimating ice extent by this method is rather high, because the image resolution is enlarged and the amount of human involvement is significant. With the automated algorithm, all the user has to do is to begin with selecting several (typical) reference points in the image to represent the 'ice' and 'water' classes, after which the algorithm will place the remaining pixels in the 'ice' or 'water' classes based on differences in spectral brightness, and then calculate the lake ice extent for this specific image. The annual ice season is defined as starting when the first ice forms in fall and as ending with the final ice break-up in spring. A total of 4384 images were processed from 01 Jan. 2006 to 31 Dec. 2017, with the following assumptions to reduce errors: (i) The onset of complete freeze-up, as well as the end of the ice break-up periods corresponded to the time at which the ice concentrations reached 95%. (ii) The onset of the freezing phase and full clearing of lakes from ice correspond to the time at which the ice cover index [7] reaches a value of 5%. (iii) If the lake did not freeze over completely during the winter period, i.e. if the ice concentration never reached 100%, the break-up was deemed to begin on the day when the ice concentration reached the maximum. (iv). Finally, some assumptions were made to reduce errors. The ice thickness was carefully studied during the Russian-Swiss experiments from satellites, drones and by applying standard hydrological methods.

The duration of total ice cover in Lake Onego has been observed for more than 60 years (Fig. 1) reveals, that the onset of freeze-up was getting delayed at a rate of 2.2 days/ decade.

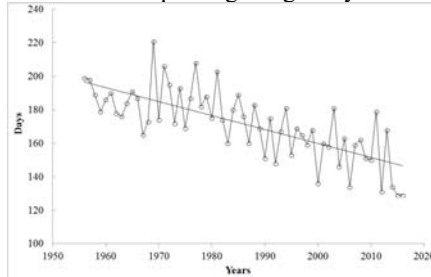


Figure 1. Duration of total ice cover in Lake Onego for the period 1956 to 2017 based on aircraft and satellite monitoring data.

The ice cover duration trend on Lake Onego is  $-0.84$  days/yr, the confidence interval being  $\pm 0.21$  days/yr at 95% significance level. The average of total ice cover duration in Lake Onego is 172 days, with a standard deviation of  $\pm 20$  days. In 2015, ice on Lake Onego stayed for only 129 days, while the maximum duration of total ice cover there was 221 days in 1969. The total ice cover duration in Lake Onego has decreased by 50 days over 60 years of observations. At the same time, most of the reduction in the total ice cover duration in Lake Onego has been due to a reduction in the ice freeze-up phase ( $-0.48$  days/yr).

Long-term observations of satellite images and airborne data are used to investigate the variability of the ice conditions on Lakes Ladoga and Onego. The historical airborne observations and satellite images in the visible and IR bands were digitized to create a database of the ice regime from 1955 onwards for Lake Onego and from 1965 onwards for Lake Ladoga. A statistical time-series analysis of airborne data to determine the ice phases and their duration for Lakes Onego and Ladoga described in Karetnikov et al. [7], Kondratyev and Filatov [8] was applied to daily satellite observations covering the 12-year period from 2006 to 2017. The results of the calculations of the ice phases (freeze-up, completely ice, and break-up) for both lakes are presented in Figure 2 A, B is usually completely ice-covered in March.

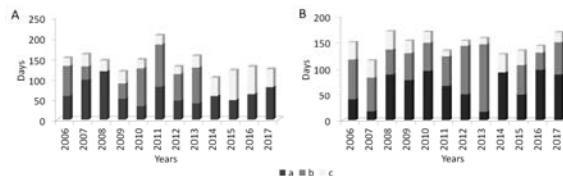


Figure 2. The duration of the ice phases: freeze-up (a), completely ice (b), and break-up (c) for the period 2006 to 2017 on Ladoga (A) and Onego (B) Lakes.

However, in 2007 and 2011 the lake froze over much later than in other years. Fig. 2, a shows that Lake Onego usually froze over completely every year, except for 2014, when the ice concentration was 80%. Ice on Lake Ladoga mostly formed in the southern and eastern parts of the lake, fluctuated over time, and was too thin for the integrated experiments to be organized on Ladoga. The duration of the ice freeze-up phase was the same for both Onego and Ladoga – 65 days, while Lake Onego cleared of completely ice within 22 days vs. 35 days for Ladoga. The duration of ‘full cover’ is 61 days for Onego and only 42 days for Ladoga. This phase can however be up to 130 days on Onego (2013), and 102 days on Ladoga (2011).

In 2016-2017, all the three phases combined lasted 142 and 148 days on Onego and Ladoga, respectively.

*This work was carried out with the financial support of the RFBR grant № 18-05-60296.*

### **Литература / References:**

1. Usachev V., Prokachev V., Borodullin V. Assessment of the dynamics of lake's ice, snow by using of remote sensing data. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1985. 103 p. [in Russian]
2. Leppäranta M. Freezing of lakes and the evolution of their ice cover. Springer, Heidelberg, 2015. 301 p.
3. Karetnikov S.G., Naumenko A.M. Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years // Hydrological processes. 2011. V. 25. pp. 2859–2867.
4. Baklagin V.N. Improvement of methods of satellite image interpretation large lakes in «water»-«ice» classes // Modern problems of science and education. 2015. V. 2(3). pp. 1–8. [in Russian]
5. Keihm S.J. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping // Icarus. 1984. V. 60(3). pp. 568–589.
6. Franssen H., Brunner P., Makobo P., Kinzelbach W. Equally likely inverse solutions to a groundwater flow problem including pattern information from remote sensing images // Water Resources Research. 2008. V. 44(1). pp. 1–14.
7. Karetnikov S., Leppäranta M., Montonen A. A time series of over 100 years of ice seasons on Lake Ladoga // J. Great Lakes Res. 2017. V. 43(6). pp. 979–988.
8. Kondratyev K.Ya., Filatov N.N. Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach // Chichester, Springer-Praxis, 1999. 312 p.
9. <http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/imagery/subsets/?area=eu>



---

## **THEORY OF MODERN OIL AND GAS FORMATION**

*A.A. Barenbaum*

*Oil and Gas Research Institute PAS, Moscow, [azary@mail.ru](mailto:azary@mail.ru)*

In the early 1990s, Russian geologists noticed that a number of fields where oil and gas production had been suspended due to the collapse of the USSR, the war in Chechnya and/or the redistribution of property, a few years later began to give an industrial inflow of hydrocarbons again. The inflow of hydrocarbons is especially pronounced at the later stages of the development of old deposits, which have been in operation for 50 years or more.

The phenomenon of replenishing the reserves of the exploited oil and gas fields was by no means assumed by known the “organic” and the “mineral” theories of hydrocarbons formation, which triggered the scientific revolution that began in the problem of oil and gas origin [1].

The result of this revolution was the birth of a new oil and gas paradigm in our country. Its essence was formulated in 1993 by B.A. Sokolov and A.N. Guseva [2]. They were the first to understand and stated that: “oil and gas are renewable natural resources of our planet, the development of which should be built on the basis of the balance of hydrocarbon generation volumes and the possibilities of their selection during the operation of fields”. Thus, the organic and mineral theories of the hydrocarbons formation, which has been at war in oil and gas geology for more than 100 years, has been replaced by a fundamentally new system of views on oil and gas origin as natural resources, fields of which are replenished during their exploitation.

By the early 2000s, the author proposed Biospheric concept of oil and gas formation [3], which provided the necessary theoretical foundation for the new oil and gas paradigm. Biospheric concept supplemented the existing ideas about oil and gas formation with the participation in this process of carbon cycle in the biosphere, and proposed to consider the oil

and gas deposits themselves as traps of mobile carbon circulating in three main cycles through the Earth's surface with characteristic times  $\sim 10^9$ ,  $\sim 10^6$  and  $\approx 40$  years. Biospheric concept proceeds from the fact that the formation of hydrocarbons in the longest cycle is due to degassing of the bowels during the subduction of lithospheric plates, in the second cycle – by the catagenesis of buried organic matter, and in the third short 40 year cycle as a result of the carbon cycle in the biosphere. The last cycle is caused by the transfer of  $\text{CO}_2$  from the atmosphere to the sedimentary cover by meteogenic waters during their climatic cycle.

Prior to the creation of the Biospheric concept, the participation of the biosphere cycle in the formation of oil and gas was not assumed. The controversy between the supporters of the organic and mineral hypotheses was about which of the two geological cycles of hydrocarbon formation dominates. The former argued that this cycle is  $\sim 10^6$  years, and the latter,  $\sim 10^9$  years.

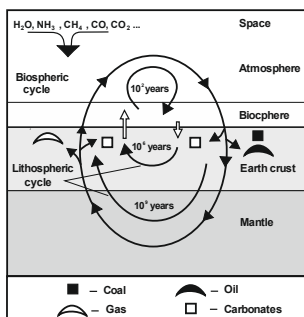


Figure 1. Scheme of the global carbon cycle on the Earth.

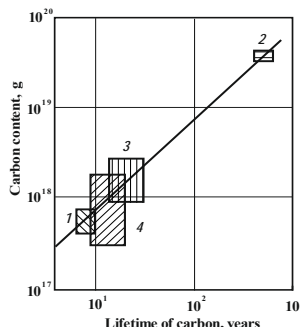


Figure 2. Collation of carbon content and its lifetime in the Earth's atmosphere (1), the World Ocean (2), living matter (3) and soil-silt layer (4); rectangles show the scatter of ratings according to literature.

Thus, Biospheric concept generalized the well-known theories of hydrocarbon genesis, supplementing them with ideas about the participation in oil and gas formation of the cycles of mobile carbon and water through Earth's surface, according to the biosphere teaching of V.I. Vernadsky.

Theoretical model has been built that makes it possible to study the modes of carbon circulation on our planet in the Precambrian, Phanerozoic and in the modern era:

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} + \frac{n_1}{\tau_1} &= \alpha_{12}n_2 + \alpha_{13}n_3 + Q(t) \\ \frac{dn_2}{dt} + \frac{n_2}{\tau_2} &= \alpha_{21}n_1 + \alpha_{23}n_3 \\ \frac{dn_3}{dt} + \frac{n_3}{\tau_3} &= \alpha_{31}n_1 + \alpha_{32}n_2 \end{aligned} \quad (1)$$

where  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  and  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  are respectively the amount of carbon and its lifetime in each cycle;  $Q(t)$  is function of carbon input to surface;  $\alpha_{ij}$  are parameters of carbon exchange between cycles.

Based on this model, it has been established that the cycles of carbon, oxygen and water on the Earth form a single geochemical system, which today is in a state close to dynamic

equilibrium. In this state, the distribution of mobile carbon (oxidized and reduced) over its main reservoirs of the system obeys a pattern (Fig. 2). The same geochemical system includes renewable oil and gas deposits, as well as deposits of aquamarine methane hydrates.

The constructed model provided the carbon balance during oil and gas formation during such a cycle. In addition, the model made it possible to take into account the mechanism of hydrocarbon formation from carbon oxides and water, which occurs in a water-saturated matrix of rocks, mechanically activated by natural seismic and tectonic processes. This mechanochemical process, which we called geosynthesis [4], was discovered by domestic scientists 40 years ago and officially recognized as a scientific discovery [5]. Experiments have shown that the donor of hydrogen in hydrocarbons during geosynthesis is water, while the donor of carbon is organic matter, CO<sub>2</sub> dissolved in water, and readily soluble carbon-containing minerals.

Biospheric concept quite adequately solved the problem of the origin of oil and gas, which allowed a new approach to the explanation of the mechanism of replenishment of hydrocarbon deposits in developed fields. Various aspects of the biosphere concept are considered by the author in many publications and, in particular, are presented in lectures [6–9].

By extracting oil, gas and coal and burning them on the surface, people upset the balance between the cycles that have developed on Earth over millions of years. As a result, carbon from cycles of  $\sim 10^6$  and  $\sim 10^9$  years passes into the biospheric 40-year cycle. Here, the "additional" carbon first enters the atmosphere and then into other reservoirs of the geochemical system, which include the underground traps of oil and gas fields, freed from hydrocarbons.

Biospheric concept explains the phenomenon of replenishment of oil and gas fields in the course of their operation by this very mechanism. The rate of replenishment deposits by hydrocarbons, however, largely depends on the degree of preservation of the traps in the oil and gas fields. Modern methods that implement hydraulic fracturing technologies are ruthlessly destroying such traps. What does not allow the deposits to be replenished with hydrocarbons in full.

Since the practice of producing oil and gas by hydraulic fracturing is widespread throughout the world, only a small fraction of the additional carbon is involved in replenishment of the fields. Most of it accumulates in the form of aquamarine methane hydrates on the shelf of the World Ocean, where the main reserves of hydrocarbons on our planet move today.

The main conclusions of the theory of oil and gas formation are as follows [10]:

1. Since the carbon cycle on Earth today is in a state close to dynamic equilibrium, the contributions to the formation of oil and gas from the mechanisms of organic matter catagenesis (organic hypothesis), degassing of the deep bowels (mineral hypothesis) and geosynthesis (Biospheric concept) are inversely proportional to the times  $\tau$  of the corresponding cycles in model (1). Taking into account the values of  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  and  $\tau_3$ , we find that the replenishment of oil and gas deposits by the mechanism of geosynthesis is at least  $\sim 10^4$  times more intense than as a result of catagenesis, and  $\sim 10^8$  times than at the bowels degassing. The rate of replenishment of deposits at specific fields is also determined by technologies of their development and in general depends on the level of modern consumption of oil, gas and coal in the world.

3. Supporters of the organic hypothesis are right that hydrocarbons are formed in the traps of the fields themselves, and the main source of carbon in oils is dead organic matter. However, oil and gas hydrocarbons are formed not as a result of the destruction of bioorganic

molecules, but due to the mechanism of geosynthesis.

4. Proponents of the mineral hypothesis, in turn, are right that oil and gas are products of polycondensation synthesis of hydrocarbons. However, the idea that hydrocarbons enter the deposits through faults in the Earth's crust from deep bowels, where they are formed, is erroneous. There are faults, but today there is practically no inflow of deep hydrocarbons into the fields along them.

#### **Литература / References:**

1. Barenbaum A.A. The Scientific Revolution in the Oil and Gas Origin Issue. New Oil and Gas Paradigm // Georesources. 2014. V. 59(4). pp. 9–15.
2. Sokolov B.A., Guseva A.N. On the possibility of fast modern oil and gas generation // Vestnik MSU. Geol. Ser. 1993. No. 3. pp. 48–56. [in Russian]
3. Barenbaum A.A. Mechanism of oil-gas traps formation // Dokl. AN. 2004. V. 399(6). pp. 802–805.
4. Zakirov S.N., Zakirov Ye.S., Barenbaum A.A. et al. Natural geosynthesis of hydrocarbons and consequences // Theory and practice of application of enhanced oil recovery methods. Proc. IV Int. Sci. Symp. Moscow, VNIINEFT, 2013. V. I. pp. 130–135. [in Russian]
5. Trofimuk A.A., Cherskiy N.V., Tsarev V.P., Soroko T.I. The phenomenon of transformation of organic matter in sedimentary rocks under the influence of tectonic and seismic processes of the Earth's crust. Scientific discovery. Certificate № 326 dated 04/21/1982. [in Russian]
6. <https://regnum.ru/news/innovatio/2377467.html?t=1518255176>
7. <https://regnum.ru/news/innovatio/2436274.html?t=1529835905>
8. <https://regnum.ru/news/innovatio/2436385.html?t=1529835995>
9. <https://regnum.ru/news/innovatio/2896742.html>
10. Barenbaum A.A. New representations on oil and gas origin in connection with the opening of the phenomenon of replenishment reserves in exploited oil fields // Georesources. 2019. V. 21(4). pp. 34–39. [in Russian]



---

## **FORMATION AND PROPAGATION OF A HYDRAULIC FRACTURE. PHYSICAL EXPERIMENT**

***G.V. Belyakov, A.A. Tairova, N.A. Iudochkin***

*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, moscouposte@gmail.com*

One third of all hydrocarbons are produced using the hydraulic fracturing method. For this, liquid is injected into the well under high pressure. In the process of fluid injection, the pressure in the well zone increases and when its critical value is reached, a fracture appears. As the flow rate increases, the overall fracture size grows, revealing new surfaces of the oil-bearing rock.

Therefore, the problems of creation and development of hydraulic fractures [1] are relevant today, and several models are being considered. The Khristianovich model (KGC-model), considered on the example of a semi-infinite fracture [2], makes it possible to refine the shape of its opening, but does not assess the influence of the injection rate and pressure on the growth pattern.

In [3,4], the distribution of flows in the fracture at constant reservoir pressure is considered, where it is shown that under these conditions the fluid velocity along the fracture is also constant. Using the Perkins model (PKN-model), the formation of a hydraulic fracture in a porous medium in two modes was considered in [5]: with low and high fluid filtration into the walls.

Nevertheless, the works do not take into account the effect of the friction force of the oil-containing formation on the impermeable «top» and «bottom».

**Experimental setup.** The paper considers the process of crack opening in a porous compressible medium by means of a model experiment. The experiments were carried out on a Hele-Show cell, where glass plates (1) 1.5 cm thick simulate the impermeable "bottom" and "top" of the oil reservoir. A sheet of compressible and permeable foam rubber (2) is placed between the glasses, which imitates oil-bearing rock. The initial thickness of the porous medium was 0.5 cm. The dimensions of the sheets were 12x50 cm. The gap between the glasses was 0.4 cm. A hole (3) was made near the edge of the "layer" - an analogue of the end of the well where the liquid is injected. Liquid under pressure enters the "well" (5), then is filtered through the cell and removed through the outlet (6). The fluid pressure is measured with a pressure gauge at the inlet to the cell (5).

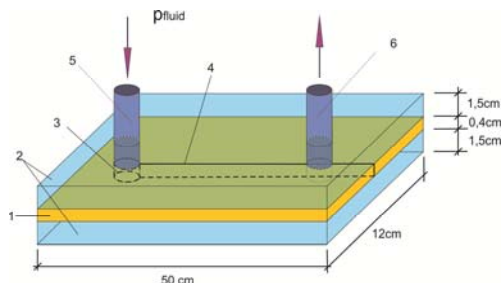


Figure 1. Scheme of experimental setup.

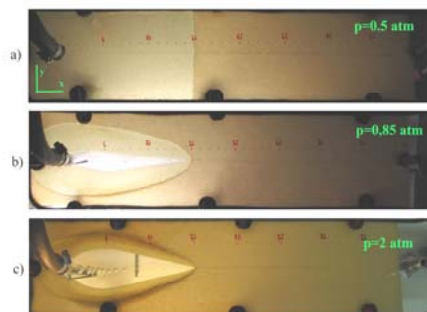


Figure 2. Comparison of three experiments with different pressure.

The fluid flow supplied to the well must overcome the forces of resistance to compression of the formation material and the forces of formation friction on the surface of the "top" and "bottom". In order to exclude the absorption of the energy of the fluid flow to fracture the "formation", through fractures of the model material are made previously along the formation from the well (4). In practical oil production technology, an analogue of a preliminary "section" of a reservoir is a mini-hydraulic fracturing, which only marks the beginning of a future working fracture. The concentration of stresses at the ends of a mini-fracture leads to a significant loss of energy to fracture the formation material and, as a consequence, to the development of the main hydraulic fracturing at much lower fluid flow parameters. The process of crack formation and development is recorded on a video camera.

**Experiments.** In experiments, the condition for the formation of hydraulic fractures is investigated. The experiments were carried out in foam rubber with a permeability of the order of initially filled with atmospheric air. A viscous liquid (glycerin) is introduced into the cell, the flow spreads from left to right (Fig. 2).

At a pressure supplied to the well of 0.5 atm, it was found that a crack does not form (Fig. 2, a), only the fluid is filtered through the medium. At an injection pressure of 0.85 atm, a crack develops, the porous material is compressed 1/5 times. (Fig. 2, b) After stopping the flow, the crack did not close. The crack in this case was only 33 cm long and about 2 cm wide. When a viscous fluid is fed into the well under a pressure of 2 atm (Fig. 2, c), the crack passes through the porous material. Crack formation and growth occurs if the pressure force of the injected fluid into the cell is greater than the friction force of the porous material against the glass. During the formation of the gap, its front part pressed the foam rubber between the glasses, expanding to the sides in the direction of the y axis, narrowing the width of the foam

rubber by 2 times. The crack opening size was about 5 cm. The maximum compression was achieved near the filtration front. Moreover, the compression wave of the foam rubber was ahead of the filtration wave, moving ahead of the filtration front. After stopping the flow, the porous medium remains in a deformed state. Under this condition, a non-closure crack 40 cm long and 5 cm wide appears.

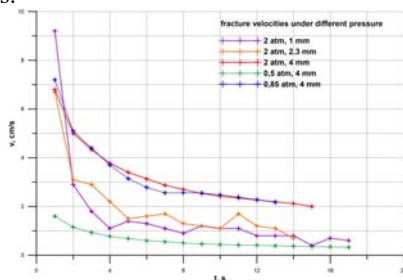


Figure 3. Fracture velocities for experiments with different gap and pressure.

Let us assume that from the side of the open slot to the beginning of the crack or to its nose with an area  $S_0$ , fluid flows in at a velocity  $v$ . Then it is filtered at a rate  $u$  determined by Darcy's law. From the equality of the flow rates of the liquid flowing in and out of the nozzle of the slot with the area  $\bar{S}$ , it follows that the ratio of the velocities  $v/u = S_0 / Sm$ , where  $m$  – is the porosity of the foam rubber ( $m = 0.98$ ). Graphs of the measured velocities of crack tip propagation and filtration in foam rubber are shown in Fig. 3.

The experiments were carried out at different gaps between glass plates and at different pressure drops. The graph in red, blue and green marks the experiments carried out with a gap of 4 mm and pressure front: 2 atm; 0.85 atm; 0.5 atm (filtration only, no cracking), purple and orange are experiments with a pressure of 2 atm and gaps of 1 mm and 2.3 mm.

Experiments have shown that the rate of crack formation is independent of the pressure drop in blue and red graphs. But it depends on the gap, thus on the porosity: purple and orange graphics. It can be seen from the graph that after the formation of a crack, the velocity at weak compression, i.e., a gap of 4 mm, is approximately 2 times higher than the velocity of a crack in a layer with a thickness of 2.3 mm.

**Conclusion.** Experiments have shown that the process of fracture formation and growth is influenced by the properties of the host rock. The fracture formed in the formation bounded by the impermeable "bottom" and "top" after release of the injection pressure retains its opening. Experiments have shown that pressure affects the width of the opening and length of the slot, but does not affect the speed of its propagation. In the process of crack growth behind the wall space, a compressed area is formed in the rock. This deformed formation can change permeability, which will further affect oil flow and reduce the efficiency of the production well.

*The work was supported by the RFBR project No. 20-35-80028 and state task 0146-2019-0007.*

### Литература / References:

1. Economides M.J., Nolte K.G. Reservoir stimulations. N.Y., Wiley, 2000. 750 p.
2. Astafiev V.I. Asymptotic analysis of hydraulic fracture crack process growth // J. of Samara St. Tech. University, Ser. Phys. and Math. Sci. 2010. No. 5. pp. 105–116. [in Russian]
3. Khanukaeva D.Yu., Filippov A.N. Modeling of flow in a fracture inside porous medium // MoP49 / ECMOR XIV, Catania, 2014.
4. Baryshnikov N.A., Belyakov G.V., Pritula I.I., Tairova A.A., Turuntaev S.B. Particle deposition in channels with permeable walls // Fluid Dyn. 2010, V. 45 (4). pp. 607–616.



5. Smirnov N.N., Tagirova V.P. Problem of propagation of a gas fracture in a porous medium // Fluid Dyn. 2008. V. 43 (3). pp. 402–417.



## FLUID CONDUCTIVITY OF NATURAL SHEAR FRACTURES IN VICINITY OF A PRODUCTION WELL DURING DIRECTIONAL UNLOADING

*N.V. Dubinya*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Dubinya.NV@gmail.com*

<sup>2</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow*

The study is aimed at understanding fluid filtration paths in naturally fractured rock masses. It is clear that natural fractures play the leading role in development of some hydrocarbon reservoirs, typically characterized by low permeability of fluid-saturated rocks. It is also clear that stress state has a certain influence at natural fractures conductive properties. Hydraulic conductivity of natural fractures existing in the vicinity of production well is analyzed in this paper with exceptional attention paid to stress state disturbance in well vicinity caused by changes of pressure at well.

Critically stressed fractures concept is used as a tool to analyze hydraulic conductivity of natural shear fractures. This concept was proposed after studying the relationship between current stress state of a number of natural fractures existing in the vicinity of production well and their fluid conductivity determined from well logs analysis [1]. It was shown that the majority of natural shear fractures that tend to be hydraulically conductive may be considered as critically stressed: shear stress  $\tau_n$  acting on the surfaces of such fractures tends to exceed the normal stress  $\sigma_n$  multiplied by internal friction of the medium  $\mu$ :  $\tau_n \geq \mu \cdot \sigma_n$ . It can be also shown that this condition corresponds to start of stable growth of natural shear fractures following modified maximum strain energy release rate criterion [2].

Shear and normal stresses acting on any fracture plane can be calculated if both spatial orientation of the fracture and stress state of the representative volume of rock containing the fracture are known. Condition of critically stressed fractures is generally used to predict whether the given fractures (orientations of which are obtained from different geophysical data analysis) are critically stressed and, therefore, hydraulically conductive in the current stress state. On the other hand, one may solve an inverse problem by finding out all possible spatial orientations of fractures which are critically stressed subjected given stresses. This inverse problem has an explicit analytical solution [3]: there is an opportunity to find spatial orientations of all critically stressed fractures for an arbitrary stress tensor. This solution may be used to analyze hydraulically conductive fractures patterns for a number of problems related to reservoir geomechanics.

The current study focuses on the behavior of critically stressed fractures in the vicinity of an oil or gas production well. It is well-known that a well drilled in the reservoir leads to stress concentration. As far as stress state of the well surrounding rock masses is altered, so are the spatial orientations of critically stressed natural shear fractures. Moreover, there are special techniques aimed at enhancing permeability of well surrounding rock masses by altering their stress state via changing pressure at well [4]. This study is aimed at understanding of changes in critically stressed fractures spatial orientations during such alteration of stress state near the wellbore which will be referred to as unloading hereafter.

Fig. 1 presents a set of stereonets – Lambert azimuthal equal-area projections – with shown limitations on spatial orientations of critically stressed fractures and directions of

principal stresses for a set of points in vicinity of a vertical well. Each figure represents its own point in space: a polar coordinate system with its center coinciding with the center of a wellbore is used to determine position of each point. Their coordinates are polar angle  $\theta$  (zero polar angle corresponds to the direction of maximum horizontal stress) and radius  $r$  – distance from the considered point to the center of the well – divided by the well radius  $R$ . A certain stress state is considered: maximum principal stress is aimed vertically; far-field effective principal stresses are: vertical stress is equal to 60 MPa, maximum horizontal stress is 30 MPa, minimum horizontal stress is 15 MPa. Pore pressure is 20 MPa, initial pressure at well is 15 MPa. Internal friction of the rock mass  $\mu = 0.6$ . Stresses acting in the considered points are calculated from the solution of Kirsch's problem with two-directional compression, well pressure and pore pressure taken into account [5]. Two stress states are considered: the one referred to as initial – before pressure at well is changed, – and the second one with stresses redistributed immediately after pressure at well is decreased by 10 MPa. Fluid flow and redistribution of pore pressure are not considered in the current study.

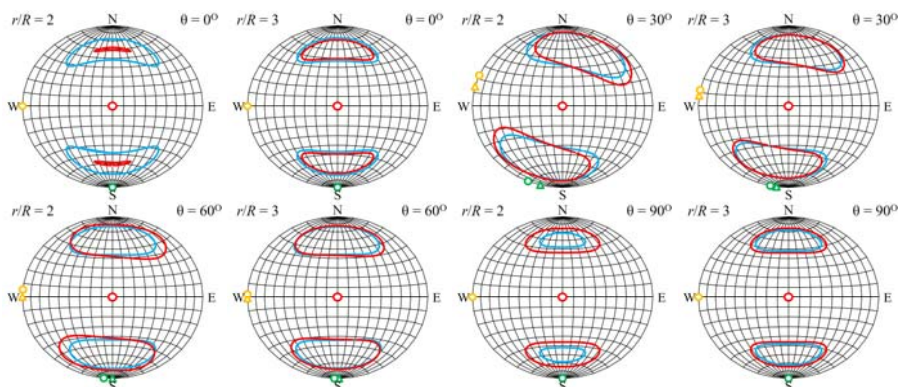


Figure 1. Stereonets with spatial orientations of hydraulically conductive fractures. Each figure corresponds to a certain point in the well vicinity with polar angle  $\theta$  and radius  $r$ . Blue line limits area of critically stressed fractures before changing pressure at well, red line – after pressure change. Circles represent principal stresses directions: red stands for  $\sigma_1$ , yellow for  $\sigma_2$ , and green for  $\sigma_3$ . Triangles are initial directions of these stresses if they have changed during unloading.

Red, orange, and green circles represent the directions of maximum  $\sigma_1$ , intermediate  $\sigma_2$ , and minimum  $\sigma_3$  principal compressive stresses after unloading. If these directions are significantly altered during unloading, their initial directions are shown by triangles of the same colors. Blue solid lines border the areas of critically stressed fractures orientations before unloading, red solid lines represent these areas after unloading.

It can be easily seen that presence of a well has a strong influence on spatial orientations of hydraulically conductive fractures. Two columns presented above may be compared to understand the degree of this influence. The left column ( $r/R = 2$ ) represents points close to the well, while the right column is for points at some distance of the well ( $r/R = 3$ ). The effect becomes negligible for radii ratios exceeding 5. It can be seen that there is a strong dependence of the polar angle which is caused by stress concentration.

Unloading also has a certain effect on hydraulically conductive fractures orientations, with relationship between the degree of this effect and polar angle being nonlinear. If one

considers direction of maximum principal stress ( $\theta = 0^\circ$ ), unloading might seem to cause contraction of critically stressed fractures possible spatial orientations. At the same time, in all other directions the area of critically stressed fractures spatial orientations at stereonets grows during unloading. That means that although in some zones some fractures that were hydraulically conductive close (fractures located to the direction of principal stress), in other zones new fractures get involved into the fluid filtration paths. It is extremely important to mention that for directions between maximum and minimum horizontal stresses the area of critically stressed fractures at stereonets not only grows but also rotates around vertical axis. That means that preferable direction of fluid filtration paths may alter, filtration may start taking place through new natural fractures not necessarily aligned with previous filtration paths. With the total number of critically stressed and therefore hydraulically conductive fractures growing this means that unloading might be expected to lead to enhancement of filtration properties of well surrounding rock masses.

There are several ways to continue current study. First of all, there is an evident opportunity to analyze different stress states and stress regimes – only Normal Fault stress regime was considered in the current study. Moreover, with the analytical form of solution to critically stressed fractures spatial orientations problem, one can easily use this concept to study development of hydraulically conductive fractures with time, during evolution of pore pressure field caused by filtration properties. Finally, there is still need to verify the proposed concept of using critically stressed fractures concept to study directional unloading method for naturally fractured reservoirs on the results of physical modeling.

*The reported study was funded by RFBR, project number № 20-05-00629.*

#### **Литература / References:**

1. Barton C.A., Zoback M.D., Moos D. Identification of Hydraulically Conductive Fractures from the Analysis of Localized Stress Perturbations and Thermal Anomalies // In: Proc. Symp. Application Geophys. Eng. Envir. Probl. 1994. pp. 945–952.
2. Shen B., Stephansson O. Modification of the G-criterion for crack propagation subjected to compression // Eng. Fract. Mech. 1994. V. 47(2). pp. 177–189.
3. Dubinya N. An analytical solution for spatial orientations of critically stressed fracture problem and its application for transitional stress regimes // Proc. 54th US Rock Mech. / Geomech. Symp. 2020. pp. 1–9.
4. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Directional Unloading Method is a New Approach to Enhancing Oil and Gas Well Productivity. Geomechanics of Oil and Gas Wells // Adv. in Oil and Gas Exploration & Production. 2020. pp. 155–166.
5. Jaeger J.G., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of Rock Mechanics. Blackwell Publishers, 2007. 4th ed. 488 p.




---

## **THE MOVEMENT OF THE PARTICLES AROUND CYLINDRICAL PARTICLE IN A SHEAR FLOW**

*A.I. Fedyushkin*

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, fai@ipmnet.ru*

In the given work the problem about movement of particles around a cylindrical particle in a shear flow for weightlessness and normal Ground conditions is considered. Cases with densities of particles bigger and smaller of density of the basic buffer moving liquid (oil particles in water and water particles in oil) are presented. It is supposed that the quantity of particles is too little and they do not render influence on the basic flow.

Movement of particles with diameter  $d$ , around a cylindrical particle of diameter  $d$ , which

located in the centre ( $x = 0, y = 0$ ) of rectangular region  $[-X < x < X, -Y < y < Y]$ , with fluid flow along an axis  $x$  with a velocity  $V(x, y) = \alpha y$  (Fig. 1) is considered. The vector of acceleration of gravity  $g$  is directed towards to an axis  $y$ .

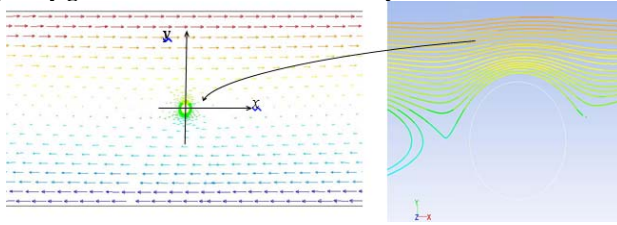
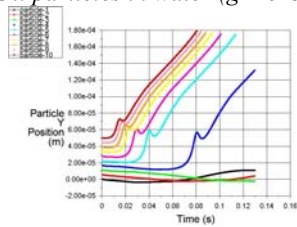


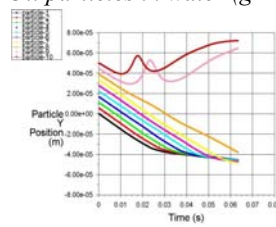
Figure 1. The scheme of simulation region, field of vector of velocity (at the left) and tracks of particles around a cylindrical particle which there is in the beginning of co-ordinates (on the right).

The particle in the centre of calculation region is simulated by not deformable cylindrical surface and rotatable on account of a shear flow. Cases of the task for surface shear stress equal to zero and tasks of a surface tension for water and oil are considered. The calculations have shown that velocity on a cylindrical surface coincides with angular speed  $\omega = 1/2 \text{rot}V$  ( $\omega$  – a vector of angular rotation of an element of environment in a point).

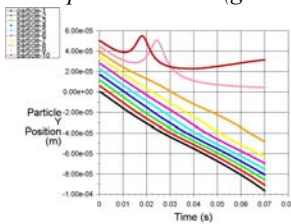
Oil particles in water ( $g = 9.81$ )



Oil particles in water ( $g = 0$ )



Water particles in oil ( $g = 9.81$ )



Water particles in oil ( $g = 0$ )

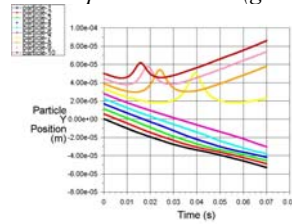


Figure 2. Y co-ordinate position of the oil and water particles from time for Ground (left column) and weightlessness conditions (right column).

Mathematical simulation is performed on the basis of numerical solutions of unsteady 2D Navier-Stokes equations for incompressible laminar fluid flow. A movement of the particles is calculated in Lagrangian variables. The friction and Saffman lift forces of interaction of the particles with a fluid flow were taken into account of model.

Initial distances of particles were  $2d$  from the centre of region and they regular intervals located on a vertical on a range from  $y = 0$  to  $y = 0.5d$ . Initial speeds of particles corresponded to velocities of environment in the given point.

In given paper results of simulation for following values of parameters: a diameter of

particles  $d = 0.0001$  m,  $X = 0.0025$  m,  $Y = 0.001$  m,  $\alpha = 300 \text{ sec}^{-1}$  are presented.

Two variants of particles and a buffer liquids are considered with following properties:

- 1) drops of diesel oil (a density is  $730 \text{ kg/m}^3$ ) in water (a density is  $875 \text{ kg/m}^3$ , a viscosity is  $0.000589 \text{ kg/m sec}$ ),
- 2) drops of water in diesel oil (a density is  $730 \text{ kg/m}^3$ , a viscosity is  $0.0024 \text{ kg/m sec}$ ).

The time dependences of position of ten particles ( $y$  co-ordinate) are shown in Fig.2.

Time dependences of distances of two oil running particles to a surface of the cylindrical particle from  $x$  coordinate are presented in Fig. 3. The given two oil particles (in Fig. 3) are chosen, as the coming most nearer to the cylindrical particle for the given series of calculations. The minimum distance of closeness with the cylindrical particle approximately is  $0.07d$ .

The results of numerical simulation have shown character of influence of gravity, viscosity, lift and drag forces on trajectories of a movement of water and oil particles in a shear flow.

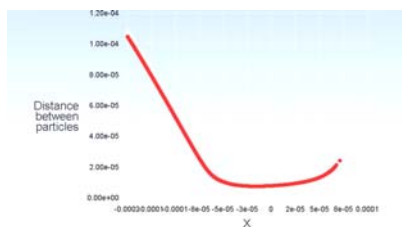


Figure 3. The dependences of distance of two oil running particles to surfaces of the cylindrical particle (which is located in the centre of region) from  $x$  coordinate.

The study was supported by the Government program (contract # AAAA-A20-120011690131-7) and was funded by RFBR, project number 20-04-60128.



---

## THE ECOLOGICAL-SOCIO-ECONOMIC SYSTEM OF WATER BODY- WATERSHED: MODELING OF OPTIMAL CONTROL

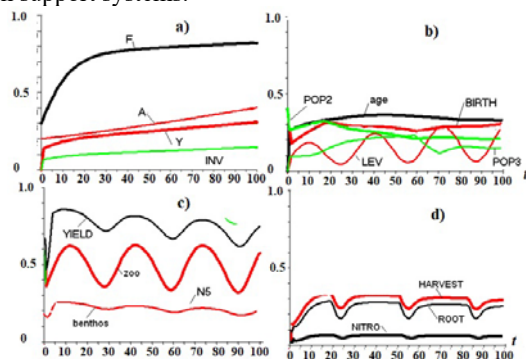
*N. N. Filatov*

*Northern Water Problems Institute, KarRC RAS, Petrozavodsk, nfilatov@rambler.ru*

The aim of the work is to develop a model of the ecological-socio-economic system of the White (Beloe) Sea and their watershed. Presented new cognitive model of the system has a hierarchical structure, including five sub models, united by a common management system. The proposed model of optimal control of environmental-socio-economic system *water body-watershed* represents the development of cognitive ecological– economic models [1, 2] and is applied to the case of the Beloe more (White Sea) and its watershed (White Sea area). The simulation of the complex socio-ecological-economic system water body-watershed took into account both feed forwards and feedbacks within sub systems and between them. The study is based on the system approach; therefore, all model sub systems have to be sensitive to the use of various spatial and temporal data of different scales, characterizing subsystems, and to respond to various scenarios of external impacts. A cognitive model has been developed earlier for the White Sea region [3], reflecting climate changes, river water quality, and the

quality of seawater, as well as the economic and social processes in the constituent entities of the Russian Federation, as well as some other processes. The developed cognitive model comprises four parts: climatic, ecosystem, socioeconomic, and managerial.

The model is intended for prognostic assessments at a qualitative level of the ongoing changes in a complex system under various scenarios of nature management and climate change. The model makes it possible to determine different targets aimed at assessing the possibilities of improving the living standards of the population, rational use and environmental protection, development of the social sphere of the White Sea region, which are important for achieving sustainable development of the region. The results can serve as the basis for constructing a system of quantitative models necessary for the development of management decision support systems.



*Figure 1. Dynamics of the characteristics of the region's Subsystems with the sinusoidal changes in climatic conditions. Subsystems: a) economics, b) demography, c) water ecosystem, d) agroecosystem. Here: a) The dynamics of the economic sub model (F) under population growth and technological progress: A – the level of technological progress, L – the working-age population, Y – the gross regional product, INV – investment, C – consumption, t – is time in years. b) LEV – standard of living of the population, age – life expectancy of the population, POP1 – population under 18 years old, POP2 – population from 18 years to 60 years old, POP3 – population over 60 years old, BIRTH – birth rate, c) FISH – fishing conditions, N5 – five-year-olds, eggs – caviar replenishment, zoo – zooplankton biomass, bentos – benthos biomass, YIELD – fish catch, d) NITRO – nitrogen in the soil, SOIL\_WAT – water in the soil, ROOT – tree roots, HARVEST – harvest.*

The cognitive model of the White Sea is considered as a tool for synthesizing heterogeneous information about a complex socio-ecological-economic system [4]. The conceptual modeling and mathematical apparatus of continuous or fuzzy logic are applied. Unlike traditional cognitive models, this one provides for a change in variables over time over 100 years, which allows us to describe the relationship of interaction agents and characterize the mechanisms of their mutual adaptation. The time step of the model is taken to be one year. To develop cognitive models of the White Sea region, the necessary information support was created: geographic information systems; Database; integrated electronic and paper atlases of the White Sea and its catchment area, original 3-D mathematical models of thermohydrodynamics and the sea ecosystem, patterns of climate change, hydrological conditions and fishing - the main occupation of the local population – Pomor's, as well as models for assessing the state and forecasting the development of the economy. Fig. 1 shows



the dynamics of the model elements over 100 years with sinusoidal 30-year (time scale of the climatic norm) fluctuations in climatic conditions (Fig. 1, a), All other external influences are assumed to be constant in time. Climate fluctuations practically do not affect the economic part of the system in the considered model, there are no noticeable quasi-periodic 30-year fluctuations.

The dynamics of the model elements over 100 years has been demonstrated, it has been shown that with quasi-cyclic climate fluctuations, economic parameters change little (Fig. 1, a), while they have a noticeable effect on the living standards of the population (Fig. 1 b), since under certain conditions more comfortable conditions are created for the population to live in this region of the North of the Russian Federation. The features of the influence of climate changes on the ecosystem of the White Sea are shown, which are manifested not only in fluctuations in water temperature, biomass of phyto- and zooplankton, fishing, but are hardly noticeable in changes in benthos (Fig. 1, c). The dependence of the outflow of the White Sea population on the size of the GRP, the availability of production assets and water quality is shown. Water quality in the region is increasing, but not as a result of investments in water treatment, but because of the reduction of pollution while reducing production and population. In the parameters characterizing agriculture (Fig. 1 d), there are no noticeable manifestations of these climatic fluctuations. This result demonstrated that only in some years with minimum mean annual air temperature are unfavorable for the harvest.

The proposed approach can be used at the qualitative level to approach the problem of optimal control in the development of White Sea and watershed scio-ecologo-economoc system.

*The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research under “Arctic” project no. 1805-60296.*

#### **Литература / References:**

1. Ross D. Economic Theory and Cognitive Science: Microexplanation. Bradford Book, MIT Press, 2019. 318 p.
2. Druzhinin P.V., Filatov N.N., Moroshkina M.V., Derusova O.V., Potasheva O.V. Modeling and spatial analysis of the ecological-economic conditions of the White Sea basin // INTERKARTO. 2018. No. 24. pp. 130–142.
3. Menshutkin V.V., Filatov N.N., Druzhinin P.V. The state and forecasts of the socio-ecological-economic system of White Sea watershed with the use of cognitive modeling // Арктика: Экол. Экон. 2018. V. 30 (2). pp. 4–17. DOI 10.25283/2223-4594-2018-2-4-17
4. Filatov N.N., Nazarova L.E., Druzhinin P.V. Effect of climatic and anthropogenic factors on the state of White Sea-watershed system // Limnol., Okeanol. 2019. No. 9. pp. 30–50. DOI 10.17076/lim1117



---

### **3D STRESS FIELD RECONSTRUCTION IN A HEAVY ELASTIC STRATUM BASED ON THE DISCRETE DATA ON STRESS ORIENTATIONS**

*A.N. Galybin*

*Schmidt Institute of Physics of the Earth (IPE RAS), Moscow, a.n.galybin@gmail.com*

This study is aimed at further development of the stress field reconstruction methods from discrete data on stress orientations in the earth's crust. The previously developed methods [1, 2] address 2D case and use the data on azimuths of the maximum compressive horizontal stresses from the World Stress Map Project (WSMP) [3]. Here a more general case of weighted 3D elastic layer is considered. The data from WSMP is still used but complemented by the data on the depth of the stress orientations that is also available from the

WSMP database. The work consists of two main parts. Firstly, the general solution for a spacious elastic layer subjected to lateral and normal loading and gravity is obtained. Then, the algorithms developed earlier are modified to include extra terms that appear in the expression for the Airy stress function.

A discussion on the approximate character of the plane stress solutions problem can be found in [4]. In particular an exact solution for that the Airy function has been found for the case  $\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$ , where the  $z$ -axis is vertical and perpendicular to the plane of the layer and the  $x$ - and  $y$ -axes lie in the plane. This solution is a quadratic function of the variable  $z$ , i.e. through the thickness of the layer. We generalize this result on the case where  $\sigma_{zz} = \sigma_0 + \gamma z$ , where  $\sigma_0$  is independent of  $z$  and  $\gamma$  is specific gravity and  $\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$ , i.e. by assuming that the vertical stress  $\sigma_{zz}$  is one of the principal stresses. The following expression for the spacious Airy function has been obtained

$$A(x, y, z) = -\frac{\nu}{2(1+\nu)} \lambda(x, y) z^2 + A_1(x, y) z + A_0(x, y) \quad (1)$$

Here  $\lambda(x, y)$ ,  $A_1(x, y)$  are harmonic functions and  $A_0(x, y)$  is biharmonic function that coincide with the Airy function for the plane problems. The function  $A_1(x, y)$  is independent while

$$\lambda(x, y) = \frac{\partial^2 A_0(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_0(x, y)}{\partial y^2}. \quad (2)$$

It is evident from (1) – (2) that in contrast to the plane problems the exact solution for the 3D layer (subjected to our assumption regarding  $\sigma_{zz}$ ) requires finding one extra harmonic function, which should be taken into account when considering the cases where the weight is important. It is the case when the thickness of the layer is not small enough (as compare to the other dimensions) in order to neglect the influence of the first two terms in (1).

It follows from the general solution (1)-(2) that the modification of the algorithms for the case considered should include recovering of  $A_1(x, y)$  in addition to the biharmonic function  $A_0(x, y)$ . For this purpose it is convenient to introduce Muskhelishvili's complex potentials instead of the Airy function by using the Goursat representation [5]. Let  $\zeta = x + iy$  be a complex variable in the plane of the layer then it can be shown that the complex valued function of the stress deviator takes the form

$$\frac{1}{2}(\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) + i\sigma_{xy} = \tau_{\max} e^{-2i\theta} = \bar{\zeta} \Phi'(\zeta) + \Psi(\zeta) + z E(\zeta) + \frac{\nu}{1+\nu} z^2 \Phi''(\zeta) \quad (3)$$

Here  $\tau_{\max} = (\sigma_H - \sigma_h) / 2$  is maximum shear stress acting in the horizontal plane with the principal stresses  $\sigma_H > \sigma_h$ ,  $\theta$  is the principal direction of the in-plane stress tensor (the angle between  $\sigma_H$  and the  $x$ -axis),  $\Phi(\zeta)$  and  $\Psi(\zeta)$  are complex potentials (holomorphic functions) of the plane problem and  $E(\zeta)$  is the third sought holomorphic function.

The proposed algorithm assumes the following steps.

- The holomorphic functions  $\Phi(\zeta)$ ,  $\Psi(\zeta)$  and  $E(\zeta)$  are sought as polynomials of  $n$ -th degree with unknown complex coefficients.

- These coefficients are found by minimizing the functional

$$\sum_{j=1}^N \left\{ \text{Im} \left[ \exp(2i\theta_j) \left( \bar{\zeta}_j \Phi'(\zeta_j) + \Psi(\zeta_j) + z_j E(\zeta) + \frac{\nu}{1+\nu} z_j^2 \Phi''(\zeta) \right) \right] \right\}^2 \Rightarrow \min \quad (4)$$

complemented by the condition that the mean of  $\tau_{\max}$  is equal to unity over the domain considered, where  $N$  is the number of data.

- The optimization problem is reduced to solving an overspecified system of linear algebraic equations, SLAE, of the type  $\mathbf{AC} = \mathbf{b}$ , where  $\mathbf{A}$  is  $(N + 1)$  by  $(6n + 3)$  matrix,  $\mathbf{C}$  is



$(6n + 3)$ ,  $\mathbf{b}$  is  $(N + 1)$  vector, all components of which are zero except of the last one equal to  $N$ .

- The SLAE is solved by the least squares method provided that the condition number of the system is not large, otherwise the SVD regularisation is applied to obtain stable solutions of the system.

- The number of terms in the approximating polynomials  $n$  is selected by analyzing both the residual and the condition number; for real data  $n$  is not big due to scattering in experimentally determined azimuths of the stress orientations.

- As soon as the solution for the coefficients is found the holomorphic functions becomes known and it is possible to determine the complex stress deviator function in (3) normalized by a positive real constant, which means that the field of the stress trajectories (angles  $\theta$ ) is found uniquely while the field of  $\tau_{\max}$  within a real parameter.

- Some calculations for synthetic data have been produced to estimate the accuracy of stress reconstruction. After that the algorithm is applied to the real geographic region with the data taken from the WSMP database. The results are compared with those obtained for the plane problems considered earlier.

*The author acknowledges the financial support of the Russian Foundation for Fundamental Research through Grant 20-05-00629 A.*

### Литература / References:

1. Galybin A.N., Mukhamediev Sh.A. Determination of elastic stresses from discrete data on stress orientations // Int. J. Solids and Structures. 2004. V. 41. pp. 5125–5142.
2. Irša J., Galybin A.N. Stress Trajectories Element Method for stress determination from discrete data on principal directions // Eng. Analysis with Boundary Elements. 2010. V. 34. pp. 423–432.
3. Heidbach O., Rajabi M., Reiter K., Ziegler M. WSM Team: World Stress Map Database Release 2016. GFZ Data Services. DOI 10.5880/WSM.2016.001
4. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of elasticity. Singapore, McCraw-Hill, 1970.
5. Muskhelishvili N.I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. Groningen, P. Noordhoff, 1963.



## HYDRODYNAMIC POTENTIALS IN 3-D SPACE

*A.V. Kistovich*

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, kavmendelevo@mail.ru*

The problem of solenoidal velocity field description by means of «potentials» is considered, i.e.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

In the 1-D case when  $\nabla = \mathbf{e}_x \partial_x$  and  $\mathbf{v} = \mathbf{e}_x v(x)$  the solution of (1) is  $v(x) = v_0 = \text{const}$  and  $v_0$  is required value of the velocity «potential» where its dimension is  $[v_0] = \text{sm}^2 / \text{s}$ .

In the 2-D case  $\nabla = \mathbf{e}_x \partial_x + \mathbf{e}_y \partial_y$ ,  $\mathbf{v} = A(x, y)\mathbf{e}_x + B(x, y)\mathbf{e}_y$  and equation (1) reforms into the equation  $A'_x + B'_y = 0$ , on the base of it the standard stream function  $\Psi(x, y)$  is introduced so

$$A = \Psi'_y, \quad B = -\Psi'_x, \quad (2)$$

where  $[\Psi] = \text{sm}^2 / \text{s}$ . At the same time the result (2) can be presented in the form

$$A = F'_y, \quad B = G'_x, \quad F + G = 0, \quad (3)$$

from which the result (2) follows and also  $[F] = \text{sm}^2 / \text{s}$ ,  $[G] = \text{sm}^2 / \text{s}$ .

In the 3-D case  $\nabla = \mathbf{e}_x \partial_x + \mathbf{e}_y \partial_y + \mathbf{e}_z \partial_z$ ,  $\mathbf{v} = A(x, y, z)\mathbf{e}_x + B(x, y, z)\mathbf{e}_y + C(x, y, z)\mathbf{e}_z$  and

equation (1) reforms into  $A'_x + B'_y + C'_z = 0$ . The sequence of arguments analogues to the sequence in the 2-D case leads to the presentation of velocity field components

$$A = F''_{yz}, \quad B = G''_{xz}, \quad C = H''_{xy}, \quad F + G + H = 0, \quad (4)$$

where  $[F] = \text{sm}^3/\text{s}$ ,  $[G] = \text{sm}^3/\text{s}$ ,  $[H] = \text{sm}^3/\text{s}$ .

From the obtained result (4) it follows that in the 3-D case only two scalar functions are sufficient for the solenoidal velocity field defining. The choice of these functions in the concrete problem is due to the convenience of the physical fields description. For example, let the z-axis is the preferred axis of the flow in the sense that the z-component of the velocity field is defined by the one scalar function and the other x- and y- components are defined by two functions. So the any solenoidal velocity field permits the representation of the form

$$\mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{S} = (R'_y - Q'_z)\mathbf{e}_x + (P'_z - R'_x)\mathbf{e}_y + (Q'_x - P'_y)\mathbf{e}_z, \quad \mathbf{S} = P\mathbf{e}_x + Q\mathbf{e}_y + R\mathbf{e}_z, \quad (5)$$

then the comparison of (4) and (5) leads to the relations

$$F''_{yz} = R'_y - Q'_z, \quad G''_{xz} = P'_z - R'_x, \quad H''_{xy} = Q'_x - P'_y. \quad (6)$$

The left part of the third relation of (6) namely the value  $H''_{xy}$  is invariant with respect to exchange  $x \square y$ . The same property should have the right side of the relation mentioned. In addition, in accordance to the condition the z-axis preference the right side should be described by means of one scalar function. This result can be achieved by the two manners:

$$1. \quad Q = -\Psi'_x, \quad P = \Psi'_y, \quad 2. \quad Q = \Psi'_y, \quad P = -\Psi'_x \quad (7)$$

In the first case from (6, 7) it follows

$$A = F''_{yz} = \Phi'_y + \Psi''_{xz}, \quad B = G''_{xz} = -\Phi'_x + \Psi''_{yz}, \quad C = H''_{xy} = -\Psi''_{xx} - \Psi''_{yy}, \quad (8)$$

where symbol  $\Phi$  is used instead of  $R$ .

The result (8) may be presented in a reduced vector form

$$\mathbf{v} = \nabla \times (\Phi \mathbf{e}_z) + \nabla \times \nabla \times (\Psi \mathbf{e}_z), \quad (9)$$

coinciding with the representation of the velocity field by means of a toroidal-poloidal potential [1]. In the second case, the relations have place

$$A = F''_{yz} = \Phi'_y - \Psi''_{yz}, \quad B = G''_{xz} = -\Phi'_x - \Psi''_{xz}, \quad C = H''_{xy} = 2\Psi''_{xy}. \quad (10)$$

The vector presentation of (10) has the from

$$\mathbf{v} = \nabla \times (-\Psi'_x \mathbf{e}_x + \Psi'_y \mathbf{e}_y + \Phi \mathbf{e}_z), \quad (11)$$

or may be presented in the form

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \nabla \times (\Phi \mathbf{e}_z) + \nabla \times \nabla \times (\Psi \mathbf{e}_z) + \nabla \times \left( (\Psi'_x + \Psi'_y) (\mathbf{e}_y - \mathbf{e}_x) \right) = \\ &= \nabla \times (\Phi \mathbf{e}_z) + \nabla \times \nabla \times (\Psi \mathbf{e}_z) + \nabla \times \left( (\Psi'_x + \Psi'_y) \mathbf{e}_z \times (\mathbf{e}_x + \mathbf{e}_y) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

which is symmetric to the exchange  $x \square y$ . The result (12) is not described in the scientific issues.

To show of the physical sense of the potentials obtained, it is necessary to consider of the mass flux of the homogeneous liquid of the constant density transported across the bounding surface per unit time.

In the 1-D case the bounding surface is the point and the value  $v_0$  is the flux of the unit mass per unit time across this point. In the 2-D case the bounding surface is the curve with two ends A and B. The flux through the curve (AB), which described in the  $(x, y)$  plane by the equation  $f(x, y) = 0$  is defined by the relation

$$\text{St} = \int_{(AB)} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} ds,$$

where  $ds$  is the differential element of the arc. As the relations  $df(x, y) = f'_x dx + f'_y dy = 0$ ,  $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = |\nabla f|/|f'_y| dx$ ,  $\mathbf{n} = \nabla f/|\nabla f|$  and  $\mathbf{v} = \Psi'_y \mathbf{e}_x - \Psi'_x \mathbf{e}_y$  are valid then the following relation have place

$$\begin{aligned} St &= \int_{(AB)} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} ds = \int_{(AB)} \frac{\nabla f \cdot \mathbf{v}}{|\nabla f|} \frac{|\nabla f|}{f'_y} dx = \int_{(AB)} \left( \Psi'_y \frac{f'_x}{f'_y} - \Psi'_x \right) dx = \\ &= \int_{(AB)} \left( -\Psi'_y \frac{dy}{dx} - \Psi'_x \right) dx = - \int_{(AB)} (\Psi'_x dx + \Psi'_y dy) = - \int_{(AB)} d\Psi = \Psi(A) - \Psi(B) \end{aligned} \quad (13)$$

The results obtained means that the flux through the curve (AB) equals to the difference of the stream function's values on the ends of the curve.

In the 3-D case, when the solenoidal velocity fields is defined by the relations (4) or by the equivalent representation

$$\mathbf{v} = \frac{1}{3} \nabla \times [(G'_x - H'_x) \mathbf{e}_x + (H'_y - F'_y) \mathbf{e}_y + (F'_z - G'_z) \mathbf{e}_z], \quad (14)$$

the flux through the surface  $S$  bounding by the curve  $L$  is defined by the value

$$\int_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{3} \iint_L [(G'_x - H'_x) \mathbf{e}_x + (H'_y - F'_y) \mathbf{e}_y + (F'_z - G'_z) \mathbf{e}_z] \cdot d\mathbf{L} \quad (15)$$

Let the curve  $L$  is described in the space by two functions

$$L: \varphi(x, y, z) = 0, \quad \psi(x, y, z) = 0,$$

so the relations  $\varphi'_x dx + \varphi'_y dy + \varphi'_z dz = 0$ ,  $\psi'_x dx + \psi'_y dy + \psi'_z dz = 0$  are valid. By the means of the announced relations the flux (15) can be presented in the form

$$\int_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{3} \iint_L [\text{sign}(J_{yz})(G'_x - H'_x) dx + \text{sign}(J_{zx})(H'_y - F'_y) dy + \text{sign}(J_{xy})(F'_z - G'_z) dz], \quad (16)$$

where  $J_{ik} = \varphi'_i \psi'_k - \varphi'_k \psi'_i$ ,  $J_{ik} = -J_{ki}$ .

As it follows from (16), in the 3-D case the liquid mass flux through 2-D bounding surface  $S$  is defined by the values of two potential functions (with regard of (4) these pairs are  $F$  and  $G$  or  $F$  and  $H$ , or  $G$  and  $H$ ) on the contracting curve  $L$  of the mentioned surface.

The presented approach to the solenoidal field description may be used also in electrodynamic of homogeneous space without of free conductive currents, in particularly for the waveguide electromagnetic fields description.

## Литература / References:

1. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. International Series of Monographs on Physics. Oxford, Clarendon, 1961. 622 p.



## VARIATIONAL IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF THE TRANSPORT MODEL IN THE SEA OF AZOV BASED ON REMOTE SENSING DATA

*V.S. Kochergin, S.V. Kochergin*

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, vskochoer@gmail.com*

To obtain adequate estimates of the dynamic characteristics of suspended matter in the sea, it is necessary to use not only modern dynamic models [1–3], models of transport and transformation of impurities, but also algorithms for searching for input parameters of these models based on the assimilation of measurement data. The quality criterion for a particular model is objective reality, i.e. measurement data. In recent years, with the development of

satellite Oceanography, modern methods of image processing and converting them into figures have appeared [4]. Such information can be received online, so the development and testing of methods for determining certain input parameters of numerical modeling is an important and urgent task. This work is devoted to the construction of parameter identification algorithms of suspended matter flows at the bottom for the passive impurity transport model. The variational approach based on solving adjoint problems is actively used for solving a wide class of problems [5–11].

In numerical implementation of algorithms for searching for optimal estimates, gradient methods are used, which are implemented by minimizing the quadratic functional of the forecast quality. The solution of the adjoint problem is necessary for constructing the gradient of the functional in the direction of which the iterative descent occurs. When implementing the variation procedure, the solution of the main, adjoint problems and the problem in variations is performed. The latter is used when defining an iterative parameter for gradient descent. In the process of integrating these problems, TVD approximations are applied [12]. To implement the assimilation procedure, the used flow fields and turbulent diffusion coefficients were obtained using the model [2, 3] in Sigma coordinates for the Azov Sea area under East wind influence.

Input information for calculations based on the impurity transport model was generated using a hydrodynamic model [2, 3] for the Azov Sea. The dynamic model was integrated to a quasi-stable solution with a constant North-Eastern wind influence 10 m/s. The obtained velocity fields and model coefficients were set as input parameters when integrating the passive impurity transport model for a period  $T = 1$  day. The calculations used a step by time  $\Delta t = 240$  s, and a step by space  $\Delta x = 0.78$  km,  $\Delta y = 1.125$  km. Vertically, the calculated grid is used  $\sigma$  – coordinates with 15 horizons.

MODIS AQUA data used for which digital concentration values are obtained [4]. Data for October 5 were assimilated using the method [13] by identifying the initial concentration field for October 4. The atmospheric effect is characterized by a small North-Eastern wind [14]. Using this concentration distribution as the initial concentration field, as a result of assimilation of the information for October 6, by identifying the flow of matter on the sea floor, we minimize the functional of the forecast quality and obtain a model field consistent with the measurement data.

Note that the real field was formed under the influence of intense wind action in the North-Eastern direction with values of about 10 m/s. The main features of the topography of the bottom of the Azov Sea are obtained – this is the Arabatskaya spit, and the shoals of the Northern spits. An increased concentration is observed in the area of Zhelezinskaya Bank and in the area of Kazantip Bay, as well as on the Azov coast of the Kerch Peninsula. The peculiarities of processing primary information made it impossible to obtain an increased concentration of digested digital information in the area of the Dolgaya spit and the Sandy Islands in the Taganrog Bay.

Additional research is needed to capture information in these areas. The use of a variational approach based on the solution of associated problems allowed us to determine the field of variable space-based flow  $Q(x, y)$  of matter on the sea bottom. In this way, when we set  $Q(x, y)$  the result found by integrating the transfer model, we achieve a minimum functional with a certain accuracy. The found field of the substance flow at the sea bottom generally correlates well with the information used about the concentration of suspended matter in the upper sea layer and repeats not only dynamically active sea areas, but also the features of the bottom relief, i.e. the main known spits and banks where agitation occurs. Note that the algorithm of identification  $Q(x, y)$  is implemented iteratively. For 10 iterations, the error in the formation of the model concentration field at the final moment of time reaches

values less than 15%.

Thus, as a result of numerical experiments, it is shown that when determining the spatial variable flow of matter, the variable method of assimilation of measurement data, based on the solution of adjoint problems, has good accuracy and convergence. The presented algorithm can be used for assimilation of satellite information about the concentration of suspended matter in the sea to solve various environmental problems in the aquatoires of the Azov and Black seas

*The work was carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0004 "Complex interdisciplinary studies of Oceanological processes determining the functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black and Azov seas and partially supported by the RFBR grant 18-45-920035.*

### **Литература / References:**

1. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of the three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-dim. Coast. Ocean models. Am. Geoph. Un. 1987. V. 4. pp. 1–16.
2. Fomin V.V. Numerical model of water circulation in the sea of Azov // Nauch. Tr. UkrNIGMI. 2002. V. 249. pp. 246–255.
3. Ivanov V.A., Fomin V.V. Mathematical modeling of dynamic processes in the sea-land zone // Sevastopol, ECOSI-Hydrophysics, 2008. 363 p.
4. Kremenchutsky D.A., Kubryakov A.A., Zavyalov P.O., Konovalov B.V., Stanichny S.V., Aleskerova A.A. Determination of the concentration of suspended matter in the Black sea according to the MODIS satellite data // Envir. Safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources. 2014. V. 29. pp. 1–9.
5. Marchuk G.I. Mathematical modeling in the environmental problem. Moscow, Nauka, 1982. 320 p.
6. Marchuk G.I., Penenko V.V. Application of optimization methods to the problem of mathematical simulation of atmospheric processes and environment // IFIP-TC7 Working conf. on Modelling and Optimization of Complex Systems. NewYork, Springer, 1978. pp. 240 – 252.
7. Shutyaev V.P. Methods for Observation Data Assimilation in Problems of Physics of Atmosphere and Ocean // Izv. Atm. Oc. Phys. 2019. V. 55. pp. 17–31.
8. Shutyaev V.P., Le Dimet F.-X., Parmuzin E. Sensitivity analysis with respect to observations in variational data assimilation for parameter estimation // Nonlin. Proc. In Geophys. 2018. V. 25(2). pp. 429–439.
9. Zalesny V.B., Agoshkov V.I., Shutyaev V.P., Le Dimet F., Ivchenko V.O. Numerical modeling of ocean hydrodynamics with variational assimilation of observational data // Izv. Atm. Oc. Phys. 2018. V. 52(4). pp. 431–442.
10. Shutyaev V.P., Parmuzin E.I. Sensitivity of Functionals to Observation Data in a Variational Assimilation Problem for a Sea Thermodynamics Model // Numer. Analys. App. 2018. V. 12. pp. 191–201.
11. Kochergin V.S., Kochergin S.V. Identification of a pollution source power in the Kazantip Bay applying the variation algorithm // Phys. Oceanogr. 2018. V. 2. pp. 69–76.
12. Harten A. On a Class of High Resolution Total-Variation-Stable Finite-Difference Schemes // SIAM J. Numer. Analys. 2002. V. 21(1). pp. 1–23.
13. Kochergin V.S., Kochergin S.V., Stanichny S.V. Variational assimilation of satellite data of surface concentration of suspended matter in the sea of Azov // Modern probl. Rem. Sens. Earth from Space. 2002. V. 17(2). pp. 40–48.
14. <http://dvs.net.ru/mp/data/201410vw.shtml>



# NUMERICAL STUDY OF STABLY STRATIFIED TURBULENT PLANE COUETTE FLOW

*E.V. Mortikov*<sup>1,2</sup>, *A.V. Glazunov*<sup>2,1</sup>, *V.N. Lykosov*<sup>2,1</sup>

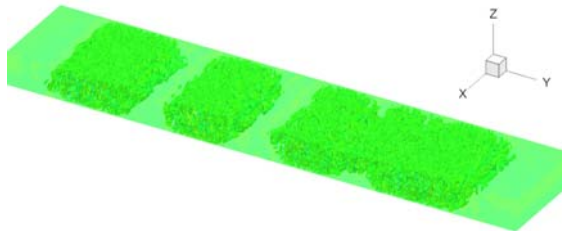
<sup>1</sup>*Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, evgeny.mortikov@gmail.com*

<sup>2</sup>*Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS, Moscow*

In stably stratified flows buoyancy force acts to dampen turbulence motions produced by shear [1] and influences the distribution of momentum and scalar fluxes. Turbulence in modern general circulation weather prediction and climate models is described by using semi-empirical closures, where the turbulent eddy viscosity and eddy diffusivity of heat (and other scalars) are assumed to be related by turbulent Prandtl (Schmidt) number which itself is an increasing function of the Richardson gradient number. The latter is defined as the ratio of the squared buoyancy frequency to the flow shear. Most turbulence closures derived from second-order moment equations (e.g., see [2]) generally assume that the turbulence and mixing are suppressed for some critical Richardson number following results of linear stability analysis [3]. This contradicts known field measurements, laboratory data and numerical simulations, where it was found that the turbulence may be sustained for very strong stability albeit in most cases for statistically non-stationary flows [4]. On the other hand, it is known that atmosphere models tend to poorly reproduce stably stratified boundary layers [5]. In this regard, clarification of physical mechanisms driving suppression or sustainment of sheared turbulence under stable conditions and improvement of turbulence closures seems necessary.

In this piece results are presented of direct numerical simulation (DNS) of stably stratified turbulent plane Couette flow. The Couette flow is a well-known flow of viscous fluid between two infinite plane parallel walls moving relative to each other in the absence of pressure gradient. The problems assumes that the flow is homogeneous in horizontal directions and the total flux of the streamwise momentum component is constant throughout the channel height. The latter condition is typical for the surface layer of the atmosphere for altitudes up to 50 m [6]. In this respect Couette flow may be considered as an idealized problem for studying the atmospheric near surface turbulent processes.

**Numerical experiments.** Numerical simulation of turbulent plane Couette flow were performed in a wide range of Reynolds (Re) and Richardson (Ri) numbers using a DNS code [7, 8] developed at Moscow State University based on momentum and energy conserving finite-difference approximations of Navier-Stokes equations. For each Reynolds number considered (Re up to  $10^5$  based on channel height and wall velocity difference) experiments were carried out for stability ranging from neutral to conditions where the laminarization of the flow occurred.



*Figure 1. Intermittent turbulence in stably stratified plane Couette flow. Isosurfaces of instantaneous vertical velocity component.*

DNS results show that models based on “return to isotropy” hypothesis and its modifications [4] are unable to correctly reproduce transition from neutral to stable conditions. Instead, simulations indicate that pressure-strain correlations for weak stability may be parameterized using rapid distortion theory [9]. This may be related to the deformation by shear of large-scale structures in the form of rolls and tilted layers observed in Couette flow [10].

For very strong stability the flow becomes intermittent with spatially confined turbulent and laminar patches alternating in the spanwise direction and spanning the entire channel length (see Fig. 1). Intermittency corresponds to formation of spanwise elongated large-scale vortices which intensify the transfer of turbulent energy to the channel center. The length of these structures in spanwise direction increases with stability and defines additional constraint on the size of the computational domain. Numerical simulations demonstrate that intermittent turbulence in plane Couette flow may be sustained for sufficiently higher  $Ri$  values than previously reported.

*The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-05-00776 A ‘Numerical simulation and parameterization of turbulent processes in geophysical boundary layers’) and by the RF President’s Grant for Young Scientists (project No. MK-1867.2020.5)*

### **Литература / References:**

1. Ivey G.N., Winters K.B., Koseff J.R. Density stratification, turbulence, but how much mixing? // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2008. V. 40. pp. 169–184.
2. Mellor G., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. V. 20 (4). pp. 851–875.
3. Miles J.W. On the stability of heterogeneous shear flows // *J. Fluid Mech.* 1961. V. 10 (4). pp. 496–508.
4. Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleerorin N., Rogachevskii I., Esau I. A hierarchy of energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure models for stably-stratified geophysical flows // *Bound.-Layer Meteorol.* 2013. V. 146. pp. 341–373.
5. Cuxart J., Holtstg A., Bearle R., Bazile E., Beljaars A., Cheng A., Conangla L., Ek M., Freedman F., Hamdi R., Kerstein A., Kitagawa H., Lenderink G., Lewellen D., Mailhot J., Mauritsen T., Perov V., Schayes G., Steeneveld G.-J., Svensson G., Taylor P., Weng W., Wunsch S., Xu K.-M. Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer // *Bound.-Layer Meteorol.* 2005. V. 118 (2). pp. 273–303.
6. Monin A.S., Yaglom A.M. *Statistical fluid mechanics.* Cambridge Mass., M.I.T. Press, 1971. V. 1.
7. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in a stratified flow // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2016. V. 52 (1). pp. 108–115.
8. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Rus. J. Numer. Anal. Math. Modell.* 2019. V. 34 (2). pp. 119–132.
9. Hunt J.C.R., Carruthers D.J. Rapid distortion theory and the ‘problems’ of turbulence // *J. Fluid Mech.* 1990. V. 212. pp. 497–532.
10. Glazunov A.V., Mortikov E.V., Barskov K.V., Kadantsev E.V., Zilitinkevich S.S. Layered structure of stably stratified turbulent shear flows // *Izv. Atmos. Oc. Phys.* 2019. V. 55 (4). pp. 312–323.



## ON THE POSSIBILITY OF EXPERIMENTAL STUDY OF NONLINEAR RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BOTTOM SOILS

*V.A. Nachev<sup>1, 2</sup>, N.V. Dubinya<sup>1, 3</sup>*

<sup>1</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region,  
Nachev@phystech.edu*

<sup>2</sup> *Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of RAS, Moscow, Dubinya.NV@gmail.com*

<sup>3</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow*

The paper presents the results of using the capabilities of finite element numerical modeling to solve problems related to stability of infrastructure objects in the development of oil and gas fields on the continental shelf.

We study the problem of estimation the effective mechanic properties of sea-floor sediments. It is clearly important to know the elastic moduli and strength properties of the sediments in vicinity of supporting constructions to understand the infrastructure response to external effects typical for offshore conditions including sea waves and seismic events [1-2]. At the same time, there are limited methods to estimate these properties as engineering drilling is extremely costly and the sediments are characterized by complicated visco-elasto-plastic rheology. There are also limited opportunities to study this rheology in laboratory conditions.

When developing oil and gas fields on the continental shelf, several geomechanics problems not typical for continental oil fields development do arise. Firstly, there is a need to build a detailed model of the mechanical properties of the upper layers of bottom sediments in the conditions of limited data on these properties. Secondly, the limited data are due to the complexity and cost of engineering drilling, which generally provides the necessary information about the properties of the upper layers of sediments.

To solve the mentioned problems, we propose usage of tube samplers of bottom sediments. These tubes make it possible to study dynamic elastic properties at the ship laboratory conditions: we introduce an algorithm to study dynamic elastic moduli of the samples using multilevel ultrasonic studies [3]. At the same time, we study the sampling process itself as a tool to estimate rheological properties of sea-floor sediments. In the current study we propose a specific analysis of the samples and sampling process. The sampling tube is equipped with tools providing an opportunity to measure its acceleration at each moment of time during sampling process. It is clear that this acceleration depends on controllable sampling process conditions and mechanical properties of sea-floor sediments being sampled. A corresponding contact problem is considered using finite-element method. It is shown that there is an opportunity to evaluate some (but not all) parameters of visco-elasto-plastic rheology of the sediments from known acceleration of the sampling tube throughout sampling process.

The paper describes the proposed set of methods for studying the mechanical properties of the upper layers of bottom sediments using sampling. It is shown that the process of bottom sampling allows us to draw certain conclusions about the mechanical properties of bottom sediments. Quantitatively, these conclusions can be made based on the numerical solution of the contact problem of immersion of the sampling device in a visco-elastic-plastic medium with rheology unknown a priori.

A numerical simulation of the immersion of the sampler to a given depth in the soil with pre-known mechanical parameters is performed to determine the mechanical parameters of the sea soil during sampling (Young's modulus, Poisson's ratio, etc.). According to a series of numerical experiments with pre-known mechanical parameters of the sea soil and the acceleration of the sampler in the soil, the acceleration depends on the mechanical parameters



of the soil. Thus, it will be possible to solve the inverse problem of determining soil parameters from the acceleration of the sampler in laboratory (real) conditions.

In the model, the sampler is affected by gravity along the Z-axis (Fig. 1). The resistance to water was not taken into account at the current stage of modeling, and the sampler falls freely. The behavior of a section of soil large enough to compensate for boundary effects is modeled (the linear size of the area under consideration is an order of magnitude higher than the maximum linear dimension of the soil tube).

The impact straight-flow ground tube can be represented by a hollow cylinder with an external diameter of 127 mm, a wall thickness of 5 mm and a length of 3 m. The initial distance from the tube to the bottom is 3 m.

Mechanical parameters of the sampling tube: Young's modulus  $E$  is 130 GPa, Poisson's ratio  $\nu$  is 0.3, the density  $\rho$  is 13000 kg/m<sup>3</sup>. Mechanical parameters of the bottom soil for different cases are presented in the table below. The soil creep is not taken into account at the current stage of modeling.

The initial state of the model is schematically shown in Fig. 1.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	1790	1910	1940	1730	1800
Young's modulus $E$ , MPa	2.2	3.8	12.7	0.7	3.7
Poisson's ratio $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Angle of internal friction $\phi$ , °	16.2	25.3	32.3	13.7	14.7
Dilation angle $\lambda$ , °	0	0	0	0	0
Cohesion $c$ , kPa	8	11	8	5	8

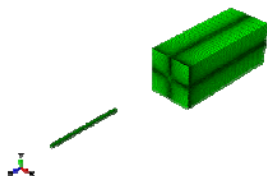


Figure 1. The initial state of the model.

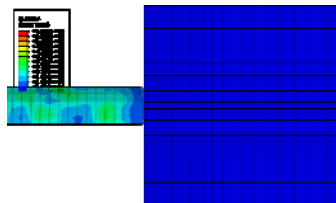


Figure 2. The position of the tube before submersion into the sea soil.

Numerical simulation is performed using the finite element method in the CAE ABAQUS package using an implicit schema. Fig. 2-5 show the tube's behavior when submerged from a depth of 3 m in the sea soil.

The depth of sampling depends on the technical conditions and the composition of deposits. As a rule, when using a 3 m long tube, the maximum core yield was from 1.5 to 2.5 meters (associated with the maximum depth of immersion), depending on the type of cut. As a result of numerical simulation, the sampling depth was 2.4 m (Fig. 3).

Fig. 4 shows the movement of the sampler along the Z-axis over time. The tube approached the sea floor at time moment of 0.782 s and then it sank into the ground during the remaining 0.41 s.

The obtained results provide an opportunity to study the relationship between rheological properties of sediments and movement of the sampler. As a result, one obtains the opportunity to check whether variation of rheological parameters of soil leads to the better match between

the modeled and observed acceleration vs. time diagram. It is clear though, that the described inverse problem is imposed as it may have more than one solution: different combinations of rheological parameters of soil may provide the same match between modeled and observed kinematics of the sampling process. Thus, the proposed algorithm may provide not a single combination of rheological parameters of sea-floor sediments, but an array of such combinations. As a result, it should be used for estimation of sediments properties together with other methods, starting from laboratory experiments carried out for the samples extracted.

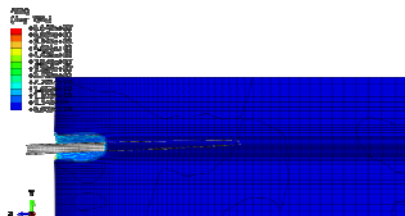


Figure 3. The position of the tube sampler and the corresponding plastic deformations of the sea soil after the submersion and stopping of the tube (in the section).

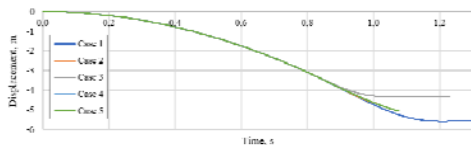


Figure 4. Movement of the tube sampler over time.

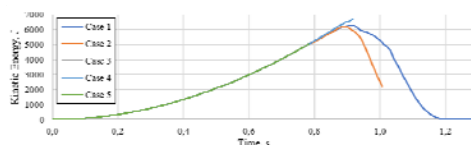


Figure 5. Changes in the kinetic energy of a tube sampler over time.

For now, the main drawbacks of the numerical model are the lack of consideration for the mechanical interaction of the tube with the liquid, the lack of consideration for ground creep and a wide range of mechanical properties of bottom soils. Physical modeling can be performed to verify the numerical model when using a material with known mechanical properties as a bottom sediment simulation.

The obtained results make it possible to improve the quality of model of mechanical properties of the sea-floor sediments. This improvement provides the corresponding increase in results of mechanical modelling of infrastructure stability and decrease the risks related to offshore fields development. Moreover, the problem of rescaling this model to the scale of geomechanical modelling using effective medium theory methods will be considered as well.

### Литература / References:

1. Randolph M., Cassidy M., Gourvenec S., Erbrich C. Challenges of offshore geotechnical engineering // Proc. Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. 2005. V. 16(1). pp. 123.
2. Marchenko I.A. Engineering surveys for location of drilling platforms in the Arctic seas // Sci. Tech. Collect. News of Gas Sci. 2019. V. 2(39). pp. 149–156.
3. Tikhotskiy S., Dubinya N., Krasnova M. Problems of Establishing Mechanical Properties Model and Stability Analysis of Supporting Constructions of Infrastructure Facilities for Offshore Oil Field Exploration // Proc. Far East Hydrocarbons. 2019. pp. 1–5.



## COMPARISON OF TWO APPROACHES TO DESCRIBING OF FALLING ROCKS

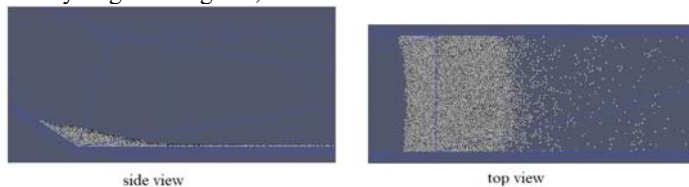
**N.S. Orlova**

*Southern Mathematical Institute – the Affiliate of VSC of RAS, Vladikavkaz,  
norlova.umi.vnc@gmail.com*

Rockfalls occur when rocks break away from a slope. There are two main approaches to describing of falling rocks. The first approach is a discrete approach. Models, based on the discrete approach, describe the motion of individual particles interacting with each other. In this regard, the implementation of such models requires the use of sufficiently powerful computing resources. One of the models, based on the discrete approach, is a discrete element method (DEM) – model. There are papers [1, 2], which present the results of modelling of rockfall motion using DEM. These results were compared with the experimental data. The second approach, that is used to model the motion of falling rocks, is a continuum approach. In models, based on the continuum approach, the rock flow is represented as the motion of a continuous medium. One of the models, based on the continuum approach, is a two-fluid model (TFM). This model uses the kinetic theory of granular gases, which takes into account the chaotic motion of rocks in both dense and rarefied states. The results of the rockfalls modeling, obtained using the TFM, are presented in [3–5].

The two approaches are very different from each other. The DEM is more physical (see Fig.1), but it requires the use of sufficiently powerful computing resources. The TFM is based on the continuum approach, so the falling rock (dolomite) is visualized as a continuous medium with a continuously distributed volume fraction of particles – alpha (see Fig.2). This approach allows to obtain the modeling results 4 times faster than the discrete approach. In addition, DEM models do not take into account the possible fluidization of the rock flow during its motion along the slope.

Fluidization is the change of the volume density of the rocks over the thickness of the layer. The volume density of the rocks may have different values during the fall. TFM model takes into account the fluidization of rocks, caused by their chaotic motion. It is possible due to the kinetic theory of granular gases, which is used in TFM.



*Figure 1. Snapshots of particle distribution obtained using the DEM.*



*Figure 2. Snapshots of particle volume fraction distribution obtained using the TFM.*

A free open source software for computational fluid dynamics (CFD) OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox) [6] and a free program code

LIGGGHTS [7] are used. We performed computations on the BL2×220 Cluster using the technological platform of the program "University cluster" UniHUB [8]. The detailed description of the models, computational conditions and the obtained results is given in [1–5].

*This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 16-35-00147.*

## Литература / References:

1. Kusraev A., Minasjan D., Orlova N., Pantileev D., Hubezhty Sh. Verification of the model of rockfall using the discrete element method // *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2016. No. 4. pp. 83–93.
2. Orlova N., Volik M. Study of falling rocks using discrete element method // *Springer Geology*. 2020. pp. 75–82.
3. Orlova N., Volik M. Mathematical modeling of the motion of rockfall using the continuum approach // *Proc. Universities. North Caucasus Reg. Natur. Sci.* 2016. No. 3. pp. 20–24.
4. Orlova N. Investigation of the influence of restitution coefficient on the results of the rock-fall modeling // *Proccesny v geosredah*. 2018. No. 3. pp. 1037–1041.
5. Orlova N., Kamenetskii E. Verification of rock falls model using the continuum approach // *Sustainable Dev. of Mountain Territ.* 2018. No. 1. pp. 7–13.
6. The open source CFD toolbox, <https://openfoam.com>
7. LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code, <http://www.cfdem.com>
8. Technological platform of the program "University cluster" UniHUB, <http://desktop.weblab.cloud.unihub.ru>



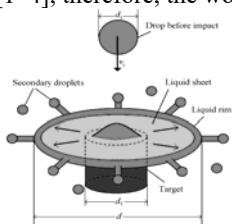
## BREAKUP OF A DROP ON COLLISION WITH AN OBSTACLE

*A. Rozhkov<sup>1,2</sup>, B. Prunet-Foch<sup>1</sup>, M. Vignes-Adler<sup>1</sup>*

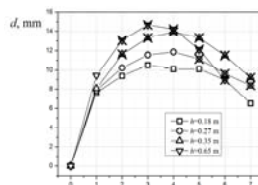
<sup>1</sup> *Université Paris-Est, Marne-la-Vallée, France*

<sup>2</sup> *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow*

Airborne infection is known to be the main route of the virus spreading. When a person sneezes, a large amount (up to 50 000) of drops of mucus and saliva are released. The droplet velocity can be very high – up to 40 m/s (various authors give values  $4.5 \div 100$  m/s), and droplets travel up to 4 m. The fate of the ejected droplets can be roughly described as follows: droplets with a diameter of more than  $5 \mu\text{m}$  settle quickly under the influence of gravity, while droplets less than  $5 \mu\text{m}$  can remain in the air for long time and carried by air currents. When a large droplet of liquid hits the solid material of a mask or filter, it can breakup into several smaller droplets, thus creating a new source of dangerous infection. The present work was undertaken to answer the question of whether it is possible to breakup of relatively large liquid droplets into smaller ones when colliding with solid obstacles and, if possible, what are the conditions and features for such transformations. On the other hand the droplet breakup as a result of droplets collision with solid obstacles is a key element of a number of modern technologies [1–4], therefore, the work has not only medical focus.



*Figure 1. Liquid lamella formed upon impact of a liquid drop onto a small disc-like target.*



*Figure 2. The lamella diameter  $d$  as function of time  $t$ .*

Taking droplet diameter  $d_i = 5 \mu\text{m}$ , droplet velocity  $v_i = 40 \text{ m/s}$ , liquid surface tension  $\gamma = 0.072 \text{ N/m}$ , liquid density  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  we obtain impact Weber number  $We_i = \rho v_i^2 d_i / \gamma = 111.1$ . In the present work we modeled droplets breakup process with experimental scheme shown on Fig. 1 [1–3].

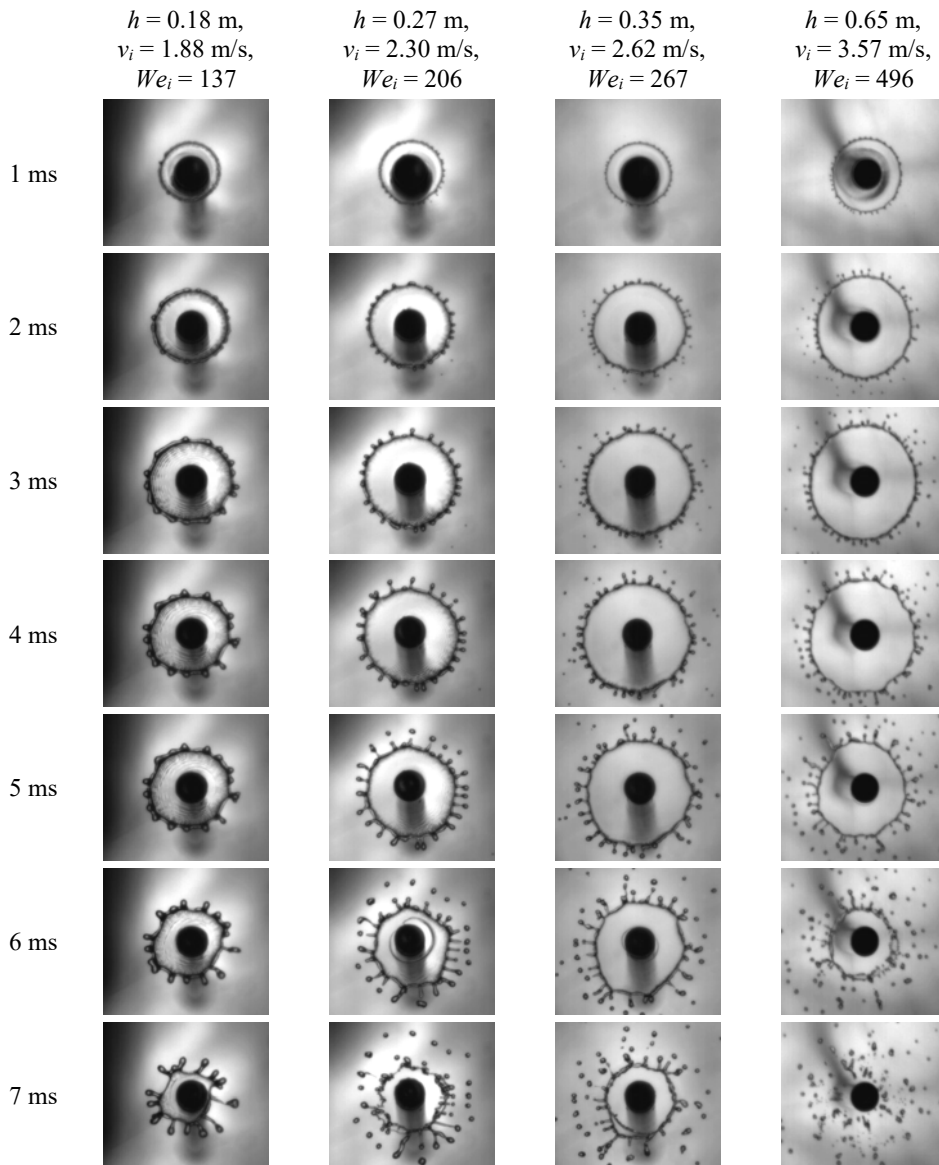


Figure 3. The top-view video frames depicting water drop impacts on disk-like target of diameter  $d_t = 4 \text{ mm}$  (seen as a black circle in the centre of the frame). Drops of diameter  $d_i = 2.8 \text{ mm}$  fall from the heights  $h = 18, 27, 35$  and  $65 \text{ cm}$ .

The drops accelerated by gravity falling from the height  $h = 0.18 \div 0.65$  m. The drops collided with the disk-like target of diameter  $d_t = 4.0$  mm. The impact conditions were  $d_i = 2.8$  mm,  $v_i = 1.88 \div 3.57$  m/s,  $\gamma = 0.072$  N/m,  $We_i = 137 \div 496$ . Thus there is certain similarity between the experimental conditions and natural case because both breakup processes occur at the same Weber numbers.

The trajectories of the rim (Fig. 2) show that maximum diameter of the lamella increases with growth of impact velocity, i.e. Weber number. Lamella is forming as a result of a drop fall from different heights  $h$  on disk-like target. Crosses indicate the drop breakup into the secondary droplets. Secondary jets and droplets are formed on the liquid rim. Frames show that at low Weber number ( $We_i = 137$ ,  $h = 0.18$  m) the drop keeps the continuity whereas at more large Weber numbers ( $We_i > 206$ ,  $h > 0.27$  m) the detachment of secondary droplets is observed and splashing occurs. Therefore a splash threshold criterion can be formulated as  $We_i > We_i^*$ , where  $We_i^* \in (137, 206)$ .

Experimental observations (Fig. 3) demonstrate that the liquid lamella is formed as a result of impact of drop on a small target. Lamella is bounded by toroidal rim. Rim initially expands and then retracts. Frames in Fig. 3 and plots in Fig. 2 show that beginning of secondary droplets detachments begins the earlier, the larger the Weber number. The intensity of the splashing also increases with the Weber number. Probably a loss of the liquid due to droplets detachments accelerates the rim receding at the late stage of the lamella life as it was discussed in [1].

Thus experimental observations demonstrate that infection spreading can occur due to droplets disintegration during impact on solid obstacle at actual natural conditions (in-situ).

*A.R. took part in the experiments of the study during his stay at the Laboratoire de Physique des Matériaux Divisés et des Interfaces, UPEM. He thanks the CNRS and the UPEM for the support of the visit. Data processing and analysis were partially (A.R.) supported by grant RFBR 20-04-60128.*

### Литература / References:

1. Rozhkov A., Prunet-Foch B. Vignes-Adler M. Dynamics of a liquid lamella resulting from the impact of a water drop on a small target // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 2004. V. 460. pp. 2681–2704.
2. Villermaux E., Bossa B. Drop fragmentation on impact // J. Fluid Mech. 2011. V. 668. pp. 412–435.
3. Vernay C., Destabilization of liquid sheets of dilute emulsions. Soft Condensed Matter [cond-mat. soft]. Universite de Montpellier, HAL. 2015. Id: tel-01254934 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01254934>
4. Bazilevsky A.V., Rozhkov A.N. Impact of a small disk on a sessile water drop // Phys. Fluids. 2020. V. 32. pp. 087101-1 – 087101-12.



## GRADIENT MORPHOLOGY IN THE LOCALIZATION OF OBJECTS IN IMAGES

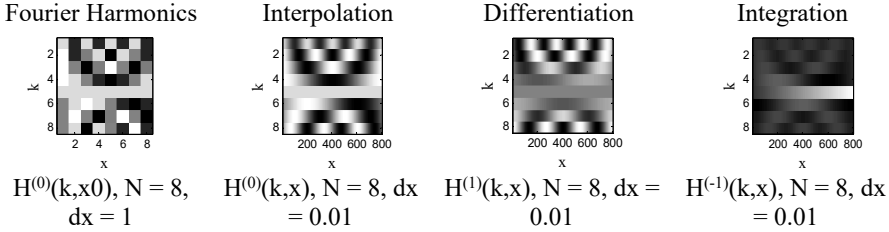
*E.N. Terentiev, I.N. Prikhodko, I.D. Kuznetsov, D.A. Verkhoturov, A.D. Dyakonova  
M.V. Lomonosov MSU, Faculty of physics, Moscow, en.teren@physics.msu.ru*

The image is associated with its vector gradient field. The analysis of vector fields with the help of single-length vector templates made it possible to localize (indicate) object in the image by calculating the main parameters of the object: position and size. The proposed method of indicating local objects using gradient fields turned out to be highly precision and noise-immunity.

**Basic concepts.** Morphology for discrete vector fields and images starts with Finite-

Dimensional Sampling Theorems (FDST) [3]. Gradient Morphology (GM) for images begins with the computation of a gradient field and a given set of Templates of vector fields of X directions of unit length with calculating the Signal-to-Noise Ratios (SNR) [3-8].

**1D FDST Theorem** (Terentiev): 3 objects are given: an array (row) of samples  $D = f(x_0)$  and two matrices: Fourier harmonics  $H^{(0)}(k, x_0)$ ,  $x_0 = 0:N-1$  и  $H^{(n)}(k, x)$ ,  $x = 0:dx:N-dx$ . Then the “continuous” function  $dx < 1$   $f^{(n)}(x) = (H^{(0)}(x_0) * D') * H^{(n)}(x)$  for  $n = 0$  passes through the samples points  $D = f(x_0)$ .



In  $f^{(n)}(x)$  the first asterisk implements the direct Fourier Transform with harmonics  $H^{(0)}(x_0) = \{H^{(0)}(k, x_0, dx = 1)\}$  and the second asterisk implements the inverse FT with  $H^{(n)}(x) = \{H^{(n)}(k, x), dx < 1\}$ .

For  $n > 0$ , we realize the  $n$ -th order derivative, and for  $n < 0$ , the  $-n$  order integral with the result in the form of an interpolated “continuous” function with digitization step  $dx < 1$ .

**3D FDST Theorem** (Terentiev): 3 objects are given: an array of samples  $D = f(x_0, y_0, z_0)$ , the matrices are the Fourier harmonics  $H^{(0)}(x_0)$ ,  $x_0 = 0 : N-1$  and  $H^{(n)}(x)$ ,  $x = 0 : dx : N-dx$ , then the “continuous” function ( $dx < 1$ )

$$f^{(n_x, n_y, n_z)}(x, y, z) = \sum_{k_x, k_y, k_z=1}^N c_{k_x, k_y, k_z} * H^{(n_x)}(k_x, x) * H^{(n_y)}(k_y, y) * H^{(n_z)}(k_z, z), \quad (1)$$

$$c_{k_x, k_y, k_z} = (f(x_0, y_0, z_0), H^{(0)}(k_x, x_0) * H^{(0)}(k_y, y_0) * H^{(0)}(k_z, z_0)) = \sum_{x_0, y_0, z_0=1}^N f(x_0, y_0, z_0) * H^{(0)}(k_x, x_0) * H^{(0)}(k_y, y_0) * H^{(0)}(k_z, z_0), \quad k_x, k_y, k_z = 1 : N \quad (2)$$

passes through sampling points  $f^{(n_x, n_y, n_z)}(x_0, y_0, z_0)$ . Scalar products (2) are realized by direct FT, and the Fourier series (1) is realized by “invers FT” with interpolation if  $dx < 1$ .

The gradient of the array of numbers  $D = f(x_0, y_0, z_0)$ :

$$grad D(x, y, z) = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} D, \frac{\partial}{\partial y} D, \frac{\partial}{\partial z} D \right\} = \{ f^{(1,0,0)}(x, y, z), f^{(0,1,0)}(x, y, z), f^{(0,0,1)}(x, y, z) \}$$

Similarly, the expressions for the divergence and the rotor are written out [9].

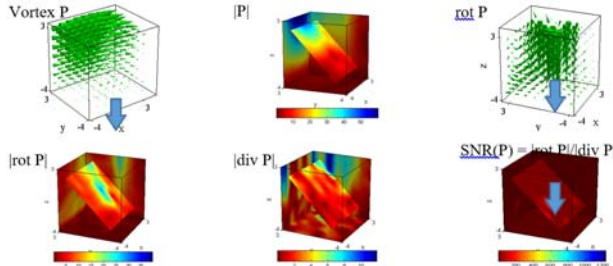


Figure 1. Here is a method for selecting the axis of rotation for a weak lateral vortex. Localization of the vortex axis of rotation in vector field.

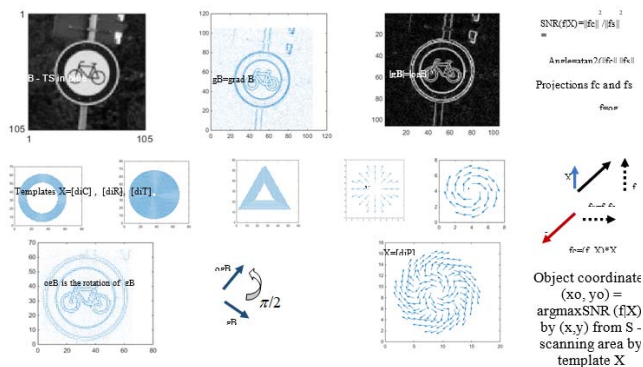


Figure 2. Illustrations of the basic concepts of Gradient Morphology.

**Localization of forest fires in space images.** Modern monitoring systems record fires by exceeding the brightness of the infrared image of a given threshold at night. In the daytime, the reflections of solar radiation from buildings are very disturbing [10, 11]. The GM method has new directions of development.

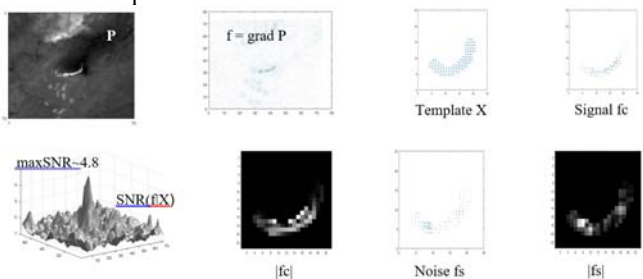


Figure 3. An example of fire localization in a space image.

**Conclusions.** The ability to accurately assess the position of the Traffic Signs opens up new ways in solving the problem of semantic analysis of images such as “reading Traffic Signs” by the Navigator robot.

Assessing the exact distance between the Eye Pupils makes it possible to formulate new semantic tasks in evaluating parameters of the “Facial Features” type for implementing facial image recognition methods.

The plans of the problem of estimating the parameters of vortices in space images of the Earth with remote monitoring [1, 2]. Our plans are to apply field theory operations in the analysis of neoplasms such as tumors, ulcers, metastases, etc. on 3D data in tomography. Possible wide applications GM in the production of processors.

### Литература / References:

1. Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Yu. F., Ustinov K. B. Mechanical-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic media // Mech. Sol. 2013. V. 48. pp. 357–363.
2. Karev V.I., Pokazeev K.V., Chaplina T.O. Modern issues of geophysics and geomechanics // Processy v geosredah. 2018. No. 4. pp. 1150–1156. [in Russian]
3. Terentyev E.N., Terentyev N.E. // Processy v geosredah. 2016. No. 4 (9). [in Russian]
4. Terentyev E.N., Terentyev N.E., Farshakova, I.I. // Springer International Publishing, DOI 10.1007/978-3-319-77788-7\_19C
5. Terentyev E.N., Shilin-Terentyev N.E., Prikhodko I.N., Farshakova I.I. Vector operations for accurate



- indication of local objects in images // Sci. Notes Physics Faculty MSU. 2018. V. 5. pp. 1850308–10. [in Russian]
6. Terentiev E.N., García-Magariño I., Shilin-Terentyev N.E., Prikhodko I.N., Farshakova, I.I. The Method of False Vortices in Designation Problems of Targets, Road Signs, Facial Features and Real Vortices in Space Images // Inf. Comp. Security. 2018. V. 1. DOI 10.24294/ics.v1i1.1025
  7. Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Farshakova I.I., Kuznetsov I.D., Shilin-Terentyev N.E. // Springer, Cham, 2019. DOI 10.1007/978-3-030-11533-3\_30
  8. Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Farshakova I.I. // Problems of accurate localization objects in imagers. 2019. AIP Conf. Proc. 2171. 110009. DOI 10.1063/1.5133243
  9. Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Farshakova I.I. // Applications of finite dimensional sampling theories. 2019. AIP Conf. Proc. 2195. 020019. DOI 10.1063/1.5140119
  10. firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/
  11. scanex.ru



## SETTING UP A MATH MICROSCOPE FOR AN EVENT HORIZON TELESCOPE

*E.N. Terentiev<sup>1</sup>, N.E. Shilin-Terentyev<sup>2</sup>, A.E. Terentyev<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *M.V. Lomonosov MSU, Faculty of physics, Moscow, en.teren@physics.msu.ru*

<sup>2</sup> *EPAM sytem, Moscow, nikolay.terentyev@gmail.com*

<sup>3</sup> *Gazprom geotechnology LLC, Moscow, A.Terentyev@gazpromgeotech.ru*

The work demonstrates the use of the Mathematical Microscope (MM) on images from the Event Horizon Telescope (EHT) with a demonstration of the conditioned super-resolved (CSR) of Powehi Black Hole images.

The discrete version of the Apparatus Function (AF) of the measuring device needs to be tuned, even if the continuous AF model is known exactly. The adjustment is necessary in order to compensate for the AF distortions introduced into the results of experimental measurements. We will associate the setting for AF conditionality with the concept of MM, for which the value of the Super Resolution SR is introduced [1–3].

**Basic concepts.** With the conditioned super-resolution, we will associate the problem of choosing a working discrete AF model  $O$  with an invertible  $R=O^{-1}$  and a small inverse norm  $Nor(R)=\|R\|$ . If  $Nor(R)$  is large, then we are forced to reduce  $Nor(pR)$  by increasing the conditionality parameter  $DI$  (from word DIAPAZON) to obtain acceptable  $Nor(pR)$ .

Note that  $Nor(pR)$  is the response to noise (or is there a standard deviation  $\sigma$  gain of white noise,  $Nor(pR)*\sigma$ ), which determine the accuracy of solving the inversion problem in the presence of additive white noise.

The task of choosing the conditioned AF  $pO = pR^{-1}$  is posed as a minimum problem (maximum accuracy) [2, 3]:

$$\min_{LO} \{ \|pR\| | Err(pO) \leq err \}, LO = \{pO | [Loc, ste, DI]\} \quad (1)$$

with the construction of the Characteristics Adequacy (CAM) of the discrete AF Model  $pO$  [2, 3]:

$$CAM pO = TAB \{x=Nor(pR), y=Err(pO), z=II(pR*O)\} \quad (2)$$

$Iz=10^{-13}$  is the mantissa error (or Instrumental zero.) in calculating the Fourier coefficients. In connection with this  $Iz$  restriction, we consider the CAM AF  $zO$  variant, taking into account the  $Iz$  inversion of the two-dimensional MTF  $M(O)$  (in the record without indices):

$$M(zR) = \begin{cases} 1/M(O), & \text{for all } |M(O)| > Iz \\ M(O) & \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{CAM } zO = \text{TAB} \{x = \text{Nor}(zR), y = \text{Err}(zO), z = \text{II}(zR * O)\} \quad (4)$$

If there is a normalization of AF O:  $\sum O = 1$ , and at zero MTF  $M(O)(0,0) = 1$ , then we will evaluate the super-resolution caused by the inversion of Iz by SR functions depending on three parameters in LO (1):

$$pSR = \sum M(pR) * M(O) / \sum M(O), \quad zSR = \sum M(zR) * M(O) / \sum M(O) \quad (5)$$

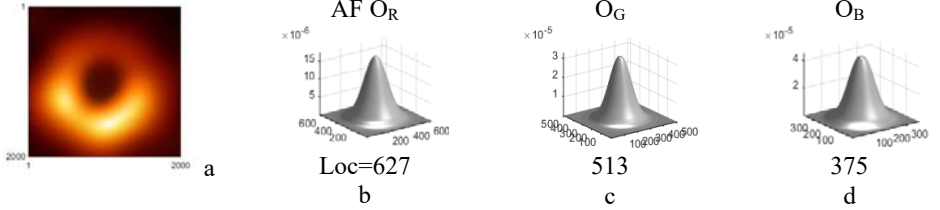


Figure 1. Fragment of the BH image (a) obtained with EHT on a full grid with  $ste = 1$ , b – d) reconstructed AF  $O_R$ ,  $O_G$  and  $O_B$ .

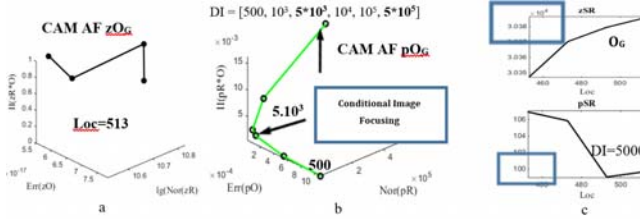


Figure 2. Here: a) CAM AF  $zO_G$ , b) CAM AF  $pO_G$ , c)  $zSR$  values  $\sim 30000$  are down by conditionality  $DI = 5000$  to  $pSR \sim 100$ .

**EHT image focusing in MM.** The Event Horizon Telescope (EHT) [9] consists of 8 receiving synchronized (in time by atomic clock) antennas in three radio bands {R, G, B}.

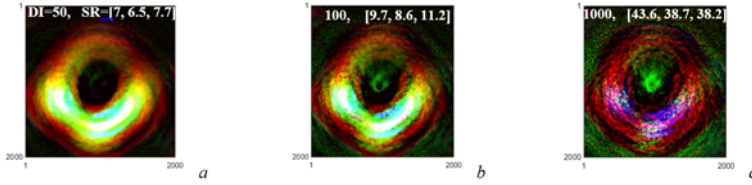


Figure 3. Demonstration of CSR EHT images at MM output.

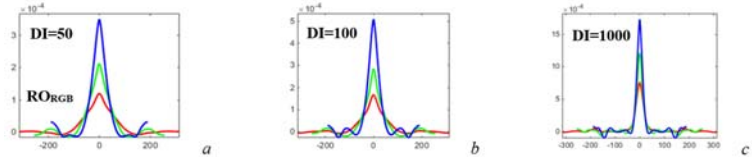


Figure 4. RORGB-resolved ORGB AFs in three radio bands {R, G, B} for conditionality  $DI = 50, 100$  and  $1000$  for focusing MM.

Professor Katerine L. Bouman first implemented the mathematical docking [10] of data from 8 telescopes, turning them into one EHT with a large aperture ( $\sim 10\,000$  km) and received the first image of the Powehi BH [2, 10], see in Fig. 1, a.

Focusing in MM is regulated by DI conditionality from the range of values [1, 1 / min |  $M(O)$  ], that is, starting from the AF  $DK = DK^{-1}$  we pass  $pO^{-1}$  to the reversed AF  $zO^{-1}$ .

Fig. 4, b–c shows the “cross-sections of the points” of which the images focused on conditionality at the output of the MM, see Fig. 3, a–c and Fig. 1, a.

**Discussion.** In the CSR AF method, the resolved  $RO_{RGB}$  AFs are more “narrow-thin”, compared to the original  $O_{RGB}$  AFs; the super-resolution values SR (5). The obtained CSR image correspond to a virtual EHT with an aperture from the Earth to the Moon.

Modifications of the CSR AF methods [2–8] can be implemented in electron microscopy, in new radar technologies, in synthetic aperture radars, CT, MRT tomography, telescopes, in the manufacture of processors and memory, etc.

*Congratulations to all 347 awarded the Breakthrough 2020 Prize in the field of fundamental physics of joint work on the Event Horizon telescope [13].*

*Special acknowledgments to Professor Katerine L. Bouman of the California Institute of Technology [12]. High data quality [2] allowed us to implement MM for EHT [14].*

## Литература / References:

1. Tikhonov A.N., Ufimtsev M.V. Statistical processing of experimental results. Moscow, Moscow University Press, 1988. [in Russian]
2. <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>
3. Terentiev E.N., Terentyev N.E. // Izv. RAN. Phys. Ser. 2015. V. 79. No. 12. pp. 1633–1637. [in Russian]
4. Terentiev E.N., Terentyev N.E. // Bull. RAS. Phys. 2015. V.79. No. 12. pp. 1427–1431. DOI 10.3103/S1062873815120229
5. Terentiev E.N., Terentyev N.E., Pirogov Yu.A., Farshakova I.I. // Sci. Notes Physics Faculty MSU. 2017. No. 6. 1761005. [in Russian]
6. Terentiev E.N., Terentyev N.E., Farshakova I.I. // DOI 10.1007/978-3-319-77788-7\_19C
7. Terentiev E.N., Shilin-Terentyev N. E. // DOI 10.1007/978-3-030-11533-3\_44
8. Terentiev E.N., Farshakova I.I., Prikhodko I.N., Shilin-Terentyev N.E. // DOI 10.11648/j.sjams.20190705.12
9. Terentiev E.N., Farshakova I.I., Shilin-Terentyev N.E. // DOI 10.11648/j.ajaa.20190703.11
10. Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Farshakova I.I. // Concept of mathematical microscope. AIP Conf. Proc. 2019. 2171. 110010. DOI 10.1063/1.5133244
11. The Event Horizon Telescope Collaboration, First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // Astrophys. J. Lett. 2019. 875:L1 (17pp). DOI 10.3847/2041-8213/ab0ec7
12. Bouman K.L., Johnson M.D., Zoran D., Fish V.L., Doeleman Sh.S., Freeman W.T. Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction // DOI 10.1109/CVPR.2016.105
13. <https://breakthroughprize.org/News/54>
14. Terentiev E.N., Shilin-Terentyev N.E. // Powehi black hole images super resolution problems. AIP Conf. Proc. 2019. 2195. 020040. DOI 10.1063/1.5140140



---

## STAR CLUSTERS, TUBES OF STELLAR CURRENTS AND JET SPITTINGS NEAR THE POWEHI BLACK HOLE

*E.N. Terentiev<sup>1</sup>, N.E. Shilin-Terentyev<sup>2</sup>, A.E. Terentyev<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *M.V. Lomonosov MSU, Faculty of physics, Moscow, en.teren@physics.msu.ru*

<sup>2</sup> *EPAM sytem, Moscow, nikolay.terentyev@gmail.com*

<sup>3</sup> *Gazprom geotechnology LLC, Moscow, A.Terentyev@gazpromgeotech.ru*

The paper presents the results of the super-resolution of images of the Black Hole (BH) Powehi obtained from the Event Horizon Telescope (EHT). When analyzing the results of Conditioned Super-Resolution (CSR) method, for the first time, a cluster of stars was identified in front of the incident shadow of the BH, two tubes of stellar currents and cluster of stars behind the BH.

Modern methods (such as regularization) for solving inverse problems are fundamentally

ineffective, because they assume "a priori smoothness of solutions" [1]. We proceed from "a priori non-smoothness of solutions" - solutions consist of their points (in our case, these are clusters of stars). Point objects allow us to Reconstruct Apparatus Functions (AF) or Antenna Pattern (AP) of the EHT.

The identification of points - clusters of stars with the estimation of the values of the achieved CSR is the basis of our methods [3–10].

We emphasize that the methods based on the Lagrangian formalism as in regularization have little to do with the methods of discrete mathematics with their own problems, statements, methods, terms and designations [3–10].

**EHT image and CSR related images.** EHT [9] consists of 8 receiving synchronized (in time by atomic clock) antennas in three radio bands {R, G, B}. Professor Katherine L. Bouman first implemented the mathematical docking [10] of data from 8 telescopes, turning them into one EHT with a large aperture (~ 10,000 km) and received the first image of the Powehi BH [1, 9].

In the CSR AF method, the resolved  $RO_{RGB} = \{R_R * O_R, R_G * O_G, R_B * O_B\}$  AF are more "narrow-thin", compared to the original  $O_{RGB}$  AF; the super-resolution values SR are calculated through the integrals from the MTF [2-5].

The obtained SR super-resolutions correspond to a virtual EHT with an aperture from the Earth to the Moon.

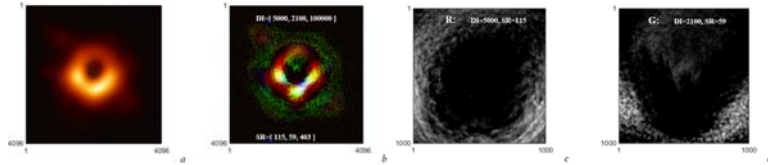


Figure 1. The image (a) of the Powehi BH, b) CSR image with two tubes of stellar currents in the R channel (d) and with the jet spitting in the G channel.

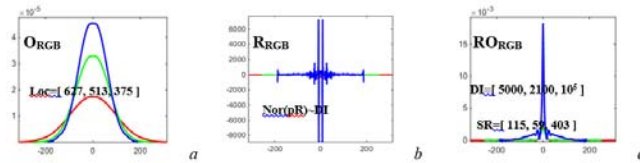


Figure 2.  $O_{RGB}$  AF (a) in three radio bands {R, G, B}, b)  $R_{RGB}$  resolving AF, c)  $RO_{RGB}$  resolved  $O_{RGB}$  AF.

**Results analysis.** In the R channel, we observe the movement of the BH shadow in the direction of the arrow, a cluster of stars in front of the BH shadow, two tubes of stellar currents and clusters of stars behind the BH. We observe the jet spitting of BH in the G channel.

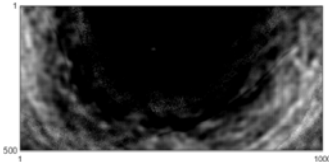


Figure 3. CSR fragment of the image in the R channel (R: DI=5000, SR=115).



Figure 4. This is a simplified diagram of clusters of stars and two tubes of stellar currents in the R channel.

**Discussion.** Of course, I would like to investigate the movements of objects - clusters of

stars, tubes of stellar currents and the dynamics of spitting - Jet Spitting over 4 days of observing Powehi BH, this would be proof of the correctness of the CSR model and the accuracy of the analysis results [14].

### Литература / References:

1. Tikhonov A.N., Ufimtsev M.V. Statistical processing of experimental results. Moscow, Moscow University Press, 1988. [in Russian]
2. <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>
3. Terentiev E.N., Terentyev N.E. // Izv. RAN. Phys. Ser. 2015. V. 79. No. 12. pp. 1633–1637. [in Russian]
4. Terentiev E.N., Terentyev N.E. // Bull. RAS. Phys. 2015. V.79. No. 12. pp. 1427–1431. DOI 10.3103/S1062873815120229
5. Terentiev E.N., Terentyev N.E., Pirogov Yu.A., Farshakova I.I. // Sci. Notes Physics Faculty MSU. 2017. No. 6. 1761005. [in Russian]
6. Terentiev E.N., Terentyev N.E., Farshakova I.I. // DOI 10.1007/978-3-319-77788-7\_19C
7. Terentiev E.N., Shilin-Terentyev N. E. // DOI 10.1007/978-3-030-11533-3\_44
8. Terentiev E.N., Farshakova I.I., Prikhodko I.N., Shilin-Terentyev N.E. // DOI 10.11648/j.sjams.20190705.12
9. Terentiev E.N., Farshakova I.I., Shilin-Terentyev N.E. // DOI 10.11648/j.ajaa.20190703.11
10. Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Farshakova I.I. // Concept of mathematical microscope. AIP Conf. Proc. 2019. 2171. 110010. DOI 10.1063/1.5133244
11. The Event Horizon Telescope Collaboration, First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // Astrophys. J. Lett. 2019. 875:L1 (17pp). DOI 10.3847/2041-8213/ab0ec7
12. Bouman K.L., Johnson M.D., Zoran D., Fish V.L., Doeleman Sh.S., Freeman W.T. Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction // DOI 10.1109/CVPR.2016.105
13. <https://breakthroughprize.org/News/54>
14. Terentiev E.N., Shilin-Terentyev N.E. // Powehi black hole images super resolution problems. AIP Conf. Proc. 2019. 2195. 020040. DOI 10.1063/1.5140140



---

## THE INFLUENCE OF EXTERNAL PARAMETERS ON THE EVENING TRANSITION IN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

*E.V. Tkachenko*<sup>1</sup>, *A.V. Debolskiy*<sup>1,2,3</sup>, *E.V. Mortikov*<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, [evtkachenko@hotmail.com](mailto:evtkachenko@hotmail.com)*

<sup>2</sup> *Moscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow*

<sup>3</sup> *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow*

<sup>4</sup> *Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow*

The atmospheric boundary layer (ABL) is the lowest part of the atmosphere and is often presented in contrast to the free atmosphere, in particular by a number of properties that characterize it. One of those properties is the diurnal variation taking place within the ABL, such as temperature variations, which have little to no effect on the free atmosphere. Another is turbulence - one of the most important transport processes in the ABL [1].

The boundary layer changes its state between stably stratified boundary layer (SBL) and convective boundary layer (CBL) as part of the diurnal cycle. This change is possible due to two types of transitional periods: the morning (from SBL to CBL) and the evening (from CBL to SBL) transition. The following criteria, taken from the BLLAST study [2] was used for singling out transitional periods: The morning transition starts when the heat flux starts to grow and ends when it changes its sign (from negative to positive). The evening transition starts when the heat flux changes its sign (from positive to negative) and ends when the SBL is well-established.

During the evening transition, the decay of the convective turbulence takes place. The

turbulence decay rate adheres to the power law  $E(\bar{t}) \propto \bar{t}^\alpha$ , where  $E(\bar{t})$  is the normalized turbulence kinetic energy (TKE) and  $\bar{t}$  is the normalized time. The parameter  $\alpha$  can be determined theoretically or empirically.

While there have been numerous studies on large-eddy simulation (LES) modeling of the evening transition and TKE decay, the majority of those do not include geostrophic wind and keep the subsidence rate at 0. Meanwhile, in the real world, there are a multitude of scales that govern the behaviour of the ABL, and their importance in ABL simulations is yet to be determined.

In [3], the influence of the wind shear in LES modeling of the evening transition was studied, showing the decrease in TKE decay as the geostrophic wind is introduced and obtaining the values of  $\alpha = 0.7$  with  $U_{gfo} = 10.0$  m s<sup>-1</sup> and  $\alpha = 1.1$  with  $U_{gfo} = 0$ . We extend on this study with RANS modeling of the evening transition with different values of  $U_{gfo}$  and observing the effect it takes on the simulation. We also look at the influence of the subsidence rate  $w_{sub}$  when it is present. Finally, we consider the effect of the aerodynamic roughness  $z_0$ , which dictates the level of land surface heterogeneity. These factors can be categorized as external and setting them up differently can provide some insight into the dynamics of the evening transition. Within this study, two types of heat flux change have been simulated: when the heat flux drops abruptly at a set point, and when it gradually diminishes over a period of time.

**Experiment setup.** Here, we use the single-column standard two-equation  $k - \epsilon$  model implementation, which contains prognostic equations for the TKE and its dissipation rate [4]. The model constants were set up in accordance with [5].

All experiments were conducted on a one-dimensional uniform grid of 512 cells, with the vertical domain of 2314 m - same resolution as in [6]. During the 12-hour run, for the first 6 hours the surface kinematic heat flux is set to be  $F_s = 0.15$  K m s<sup>-1</sup> to build up a CBL, then it changes either abruptly or gradually over the course of  $\tau = 1$  hr to  $F_s = 0$  (the neutral boundary layer). The rest of the setup follows that of the CBL experiment setup by [7].

At the end of the 6th hour of the run, the thickness of the CBL reaches its maximum height  $h_{CBL}$ , depending on chosen coefficients. Deardorff velocity scale [8] is  $w_{*0} = (F_s h_{CBL})^{1/3}$ . The surface buoyancy flux  $F_b = g \theta_0^{-1} F_s$ , where  $g = 9.81$  m s<sup>-2</sup> is the gravitational acceleration and  $\theta_0^{-1} = 0.003$  K<sup>-1</sup> is the air temperature expansion coefficient. The turbulence turnover time scale is  $t_* = h_{CBL}/w_{*0}$ . The normalized quantities for the decay power law are  $E_n = E/w_{*0}^2$ ,  $t_n = t/t_*$  [6].

**Results.** Fig. 1-3 show changes of TKE with time during the evening transition (hours 6-9 of the experiment).

It appears that the result obtained in this study follows that obtained in [3], as in the geostrophic wind makes the TKE decay slow down (Fig. 1). Even the weakest geostrophic wind causes the decay to wane, and as it gets stronger, the decay intensity drops further. The decay rate itself appears to be higher than in LES experiments of [3].

It appears that the choice of the way heat flux decreases has a bit of an effect on the decay rate – abrupt change results in faster decay during the main stage (Fig. 2), and it is even more evident with the chosen time scale, accounted for the decrease period

Much less difference was observed in experiments with the subsidence rate  $w_{sub}$ . The difference in the results, no matter the change of the  $w_{sub}$  value, is almost negligible, both for cases with geostrophic wind and without it.

Considering the aerodynamic roughness  $z_0$  (Fig. 3), some difference is present in the magnitude of the decay - the TKE minimum varies for each value. The time it takes to reach the TKE minimum correlates with the magnitude - the lower it is, the longer it takes. It is easy

to see, however, that in general, all three experiments display identical dynamics of the decay.

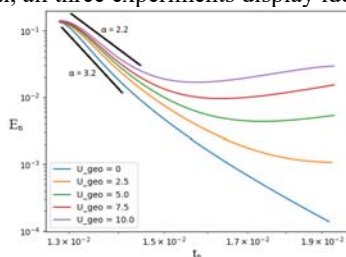


Figure 1. TKE decay with different values of  $U_{geo}$ .

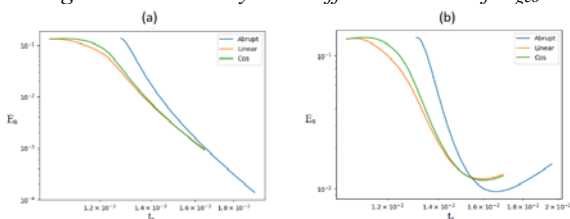


Figure 2. TKE decay for different methods of heat flux decrease.

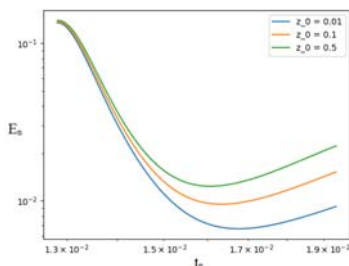


Figure 3. TKE decay with different values of  $z_0$ ,  $U_{geo} = 7.5$ .

This study was funded by Russian Foundation of Basic Research within the project 20-05-00776, as well as the grant of the RF President within the MK-1867.2020.5 project.

### Литература / References:

1. Stull R.B. An Introduction To Boundary Layer Meteorology. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1988.
2. Carreras E.B. Transitional periods of the atmospheric boundary layer. Catalonia, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
3. Pino D., Jonker H.J.J., de Arellano J.V.G., Dosio A. Role of shear and the inversion strength during sunset turbulence over land: characteristic length scales // Bound.-Layer Meteorol. 2006. V. 121. pp. 537–556.
4. Burchard, H. Applied Turbulence Modelling in Marine Waters. Berlin, Springer, 2002.
5. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Debolskiy A.V., Lykov V.N., Zilitinkevich S.. Modeling of the Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy // Dokl. Earth Sci. 2019. V. 489(2). pp. 1440–1443.
6. Guemaoui O. E., Maronga B., Reuder J., Esau I., Wolf T. Scaling the Decay of Turbulence Kinetic Energy in the Free-Convective Boundary Layer // Bound.-Layer Meteorol. 2019. V. 173. pp. 79–97.
7. Debolskiy A., Stepanenko V., Glazunov A., Zilitinkevich S. Bulk models of sheared boundary layer convection // Izv. Atm. Oceanic Phys. 2019. V. 55(2). pp. 139–151.
8. Dearford J.W. Convective velocity and temperature scales for the unstable planetary boundary layer and for Rayleigh convection // J. Atm. Sci. 1970. V. 27(8). pp. 1211–1213.





# RETRACKING SKEWNESS OF THE SEA SURFACE ELEVATIONS FROM ALTIMETER RETURN WAVEFORMS

*N.N. Voronina*

*Marine Hydrophysical Institute Russian Academy of Sciences, Sevastopol,  
voronina.nataly@mail.ru*

Currently, the main factor controlling the bias in altimetry measurements of the mean surface level of the sea is the change in the surface state [1–2]. The change skewness of sea surface elevations leads to biases in measurements of the level [3]. This is one of the main limitations for oceanographers and geophysicists in using altimeter data.

The retracking of geophysical parameters from radar altimeter signals based on the Braun model of return pulse waveform [4]. In Braun model, the return signal is a convolution of the three functions

$$V(t) = F_r(t) * s_r(t) * q(t), \quad (1)$$

where  $t$  is time;  $F_r(t)$  is the average flat surface impulse response,  $s_r(t)$  is the radar system point-target response,  $q(t)$  is the surface specular point density function written in the altimeter's time domain. Function  $q_s(t)$  is related to the probability density function (PDF) of the sea surface elevation

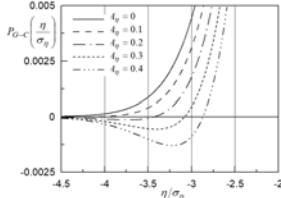
$$q(t) = \frac{d\eta}{dt} P(\eta(t)), \quad (2)$$

where  $P(\eta)$  is PDF of the sea surface elevation  $\eta$ . Parameters  $t$  and  $\eta$  are related by  $t = \eta/(c/2)$ , where  $c$  is the speed of light.

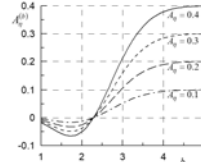
It follows from the (1) and (2) that the solution of the inverse problem (determination of the skewness) depends on how well we define the model  $P(\eta)$ . The sea waves are a weak nonlinear process and the distribution of the surface elevation refers to quasi-Gaussian. Commonly, the PDF of sea surface elevation  $P(\eta)$  is described by the truncated Gram–Charlier distribution. When the skewness is determined according to the altimeter data, PDF is used [5]

$$P_{G-C}(\eta) = \frac{\exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_\eta^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma_\eta} \left[ 1 + \frac{A_\eta}{6} H_3\left(\frac{\eta}{\sigma_\eta}\right) \right], \quad (3)$$

where  $\sigma_\eta$  is the standard deviation of sea surface elevation,  $A_\eta$  is skewness,  $H_3$  is the Hermitian polynomial of order 3.



*Figure 1. Negative values in the truncated Gram-Charlier distribution (4).*



*Figure 2. The change in the skewness when limits in (4) is change.*

If the Gram–Charlier distribution contains only the first few terms, its scope is limited. The real capabilities of the simulation of the distribution of sea surface elevations using the Gram–Charlier series to analyze in paper [6]. If only the terms of the series not greater than of the third order are used, negative values of the PDF can take place at  $|\eta/\sigma_\eta| \geq 2.5$ . This function with real values of the sea wave's skewness is shown in Fig. 1. Thus, there is a need of PDFs building that do not have the restrictions inherent in a truncated Gram-Charlier



distribution [7].

The model of the reflected radio impulse corresponds to the truncated distribution of sea surface elevations if the formula (3) uses PDF. This means that regions near the crests of high waves, making a significant contribution to the asymmetry of the full distribution of elevations, are excluded from consideration. The model of the probability density of the sea surface elevations in describing the shape of the reflected radio impulse represented as

$$P^b(\eta) = \begin{cases} 0 & n\mu \eta \leq b\sigma_s \\ N_b P(\eta) & n\mu b\sigma_s < \eta < b\sigma_s \\ 0 & n\mu \eta \geq b\sigma_s \end{cases} \quad (4)$$

where the dimensionless parameter  $b$  defines the region of values of the surface elevations forming the reflected pulse;  $N_b$  is normalizing factor. Skewness  $P_{G-C}^{(b)}(\eta)$  will differ from the true skewness  $A_\eta$ . These discrepancies are shown in Fig. 2. If the parameter  $b$  is less ( $b < 2.3$ ), then  $P_{G-C}^{(b)}(\eta) < 0$ . If  $b = 3$  the relation  $A_\eta^{(b)} \approx 2A_\eta$  is satisfied.

The present work is devoted to the study of the possibility of remote determination from the satellite of the skewness of the sea surface elevations. The factors limiting the possibility of restoring the skewness of the sea surface distribution by retracking altimeter waveforms are considered. We have shown the existing technique for calculating the distribution parameters could not fully take into account the effect of high wave crests on the shape of the reflected radio impulse. This leads to a distortion of the skewness values obtained from altimetry data. The error in determining the skewness depends on the choice of the probability density function model. It also depends of the magnitude of the kurtosis of sea surface elevations.

*The work was carried out as part of a state assignment on the topic No. 0827-2018-0003 "Fundamental research of oceanological processes that determine the state and evolution of the marine environment under the influence of natural and anthropogenic factors, based on methods of observation and modeling".*

#### **Литература / References:**

1. Pokazeev K.V., Zapevalov A.S., Pustovoytenko V.V. The simulation of a radar altimeter return waveform // Moscow Univ. Phys. Bull. 2013. V. 68 (5). pp. 420–425. DOI 10.3103/S0027134913050135
2. Wang X., Miao H.L., Wang G.Z., Wang Y.Q., Zhang J. Direct-estimation of sea state bias in Hy-2 based on a merged dataset // Proc. Int. Conf. Computer Inform. Syst. and Industr. Appl. 2015. Bangkok, Thailand. pp. 762–766. DOI 10.2991/cisia-15.2015.207
3. Zapevalov A.S. Effect of skewness and kurtosis of sea-surface elevations on the accuracy of altimetry surface level measurements // Izv. Atm. Ocean Phys. 2012. V. 48 (2). pp. 200–206. DOI 10.1134/S0001433812020120
4. Brown G.S. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1977. AP-25. pp. 67–74. DOI 10.1109/tap.1977.1141536
5. Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G. Measuring global ocean wave skewness by retracking RA-2 Envisat waveforms // J. Atm. Oceanic Tech. 2007. V. 24. pp. 1102–1116. DOI: 10.1175/JTECH2014.1
6. Zapevalov A.S. High-order cumulants of sea surface elevations // Russ. Meteorol. Hydrol. 2011. V. 36 (9). pp. 624–629. DOI 10.3103/S1068373911090081
7. Zapevalov A.S., Pustovoytenko V.V. Modeling of the probability distribution function of sea surface slopes in problems of radio wave scattering // Radiophys. Quant. Electronics. 2010. V. 53 (2). pp. 100–110. DOI 10.1007/s11141-010-9206-z



## ИЗУЧЕНИЕ ФОТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В НАСКАЛЬНЫХ ЗАПЛЕСКОВЫХ ВАННАХ ОСТРОВА АТЛАСОВА (ВУЛКАН АЛАИД, КУРИЛЬСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА)

Л.П. Аникин<sup>1</sup>, А.А. Жильцова<sup>2</sup>, О.Н. Лунина<sup>3</sup>, С.В. Пацаева<sup>2</sup>, В.А. Рашидов<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, alp@kscnet.ru, rashidva@kscnet.ru

<sup>2</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, aa.zhil'tcova@physics.msu.ru, spatsaeva@mail.ru

<sup>3</sup> Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ "Фундаментальные основы биотехнологии" РАН, Москва, onlun@yandex.ru

<sup>4</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток

Вулкан Алаид, расположенный на о. Атласова (рис. 1) в Курильской островной дуге, является самым высоким (2339 м над уровнем моря), самым северным и одним из наиболее активных вулканов в пределах Большой Курильской гряды. Остров-вулкан Алаид вместе с подводным вулканом Григорьева составляют единый вулканический массив Алаид [1]. В 2012 г. вулкан Алаид активизировался [2], а последнее по времени извержение вулкана Алаид произошло в 2015-2016 гг. и было терминальным [3].

Ландшафты Алаида включены в группу уникальных островных ландшафтов Тихоокеанского побережья России. В настоящее время животный и растительный мир о. Атласова изучается дальневосточными учеными. Несомненно, остров-вулкан Алаид является уникальным объектом для комплексных междисциплинарных исследований [4].

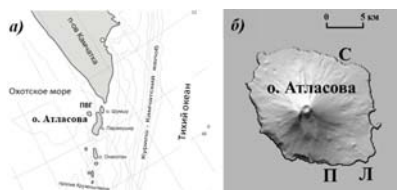


Рисунок 1. Местоположение о. Атласова (вулкана Алаид) в Курильской островной дуге (а) и расположение наскальных ванн с «цветной водой» на острове. П – мыс Пологий, Л – мыс Лава, С – бухта Северная (б).

Впервые в 2015 г., а затем в 2016-2017 гг. сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН во время ежегодных комплексных геолого-геофизических исследований вулкана Алаид, в разных точках о. Атласова (в районе мыса Пологий, мыса Лава и бухты Северной) в летнее время обнаружены наскальные ванны с водой ярко пурпурного и красного цвета (рис. 1б, 2), никогда ранее не описывавшиеся в литературе не только на о. Атласова, но и на других островах Большой Курильской гряды [5-7].

Отобранные из наскальных водоемов уникальные образцы воды красно-пурпурного, желтого и зеленого цвета были доставлены в Москву. Из этих проб в институте микробиологии ФИЦ «Биотехнологии» (РАН) были получены накопительные культуры анаэробных фототрофных бактерий. Было показано, что в пробах воды 2015 года, отобранных в лавовом потоке в районе мыса Пологий, пурпурно-красный цвет воды был обусловлен массовым развитием пурпурных серобактерий рода *Thiocapsa*, а в пробах 2017 года, расположенных в районе мыса Лава, – массовым развитием пурпурных серобактерий рода *Thiorhodococcus*.

Спектральное исследование исходных проб «пурпурной» воды и полученных накопительных культур, проведенное в лаборатории физического факультета МГУ, показало типичные для пурпурных серных бактерий спектры поглощения суспензии клеток в водной среде (рис. 3) [8].



Рисунок 2. Наскальная ванна с «цветной водой» на лавовых потоках в районах мыса Пологий в 2015 (а) и мыса Лава в 2017 г. (б).

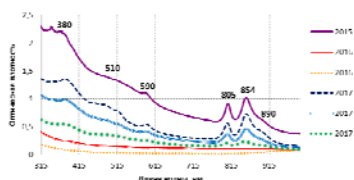


Рисунок 3. Примеры спектров поглощения проб «пурпурной» воды (пунктир) и накопительных культур (сплошные линии) из наскальных ванн острова-вулкана Алаид.

Пики 380 нм, 590 нм, 805 нм, 854 нм характерны для бактериохлорофилла *a* – основного пигмента пурпурных серобактерий.

Проведенные в 2015-2017 гг. комплексные геолого-геофизические исследования [5-7], гидрохимический анализ пресной воды и заплесковых луж в лавовых потоках [5] в совокупности со спектральным анализом привезенных образцов позволили не только выявить наличие анаэробных фототрофных бактерий в трех местах на о. Атласова, но и выдвинуть некоторые предположения о необходимых условиях для развития анаэробных фототрофов в условиях природы Большой Курильской гряды.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 17-04-01263, 18-000041 и 18-05-00410).*

### Литература / References:

1. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А., 2006. Подводный вулкан Григорьева (Курильская островная дуга). Вулканология и сейсмология. № 5: 17-26.
2. Рашидов В.А., Малик Н.А., Фирстов П.П., Аникин Л.П., Дубровская И.К., Мельников Д.В., Пилипенко О.В., Сокоренко А.В., Чирков С.А., Шакирова А.А., Яшук В.В., 2012. Активизация вулкана Алаид (Курильские острова) в 2012 году. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 20 (2): 8-15.
3. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., 2016. Активность вулканов Курильских островов в 2016 г. Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 33 (1): 83-88.
4. Рашидов В.А., 2013. Побочный вулкан Такетоми (о. Атласова, Курильская островная дуга). Геофизические процессы и биосфера. № 1: 5-13.
5. Рашидов В.А., Аникин Л.П., 2015. Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в августе 2015 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 27 (93):102-107.
6. Рашидов В.А., Аникин Л.П., 2016. Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2016 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 31 (3):94-103.
7. Рашидов В.А., Аникин Л.П., 2017. Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2017 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 35 (3): 112-117.

8. Милкоков А.С., Пацаева С.В., Южаков В.И., Ростовцева Е.Л., 2007. Спектроскопическое исследование культуры пурпурных серных бактерий *Chromatium* sp. в водной среде. Вестник Моск. Ун-та. Физика, астрономия. № 3: 46–49.



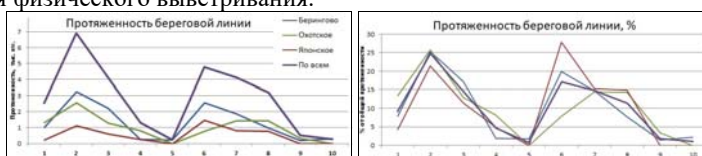
## БЕРЕГА КОНТАКТНЫХ ЗОН СЕВЕРНОЙ ПАЦИФИКИ

**В. В. Афанасьев**

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск,  
vvasand@mail.ru*

Границы геосистем (ГС) представляют собой относительно подвижные зоны взаимовлияний и взаимодействий соседних ГС – контактные географические структуры [1–3]. При этом большую часть геоморфологических границ можно рассматривать как разновидность контактных зон, выделяемых в физической географии, и к ним приурочена подавляющая часть земных процессов и явлений [4, 5].

Анализ карт морфогенетических типов берегов Северной Пацифики позволил выявить специфику берегового морфолитогенеза морей субарктической и умеренной поясности. Установлено, что для морей Северной Пацифики характерно двухмодальное распределение протяженности берегов различного типа. Первый максимум относится к абразионно-денудационным скалистым берегам, со значительным вкладом в процессы разрушения физического выветривания.



**Рисунок 1.** Протяженность типов берегов морей Северной Пацифики. Типы берегов: 1 - с ледниково-тектоническим расчленением (фиордовые), тектонически обусловленные; 2 - абразионно-денудационные; 3 - абразионные (выровненные и бухтовые); 4 - абразионные отмершие; 5 - термоабразионные и ледовые; 6 - абразионно-аккумулятивные (выровненные и бухтовые); 7 - созданные волновыми процессами, пляжевые; 8 - созданные волновыми процессами, лагунные; 9 - созданные приливными и сгонно-нагонными процессами; 10 - созданные устьевыми процессами (дельтовые).

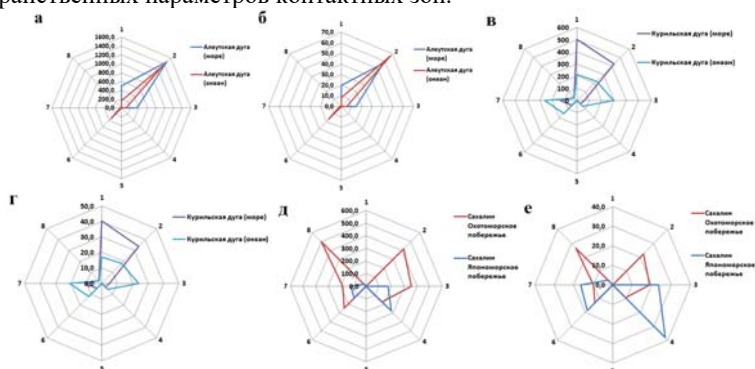
Второй пик формируют абразионно-аккумулятивные берега. Подобное распределение типов берегов наряду со структурно-геологическими особенностями строения побережий вероятно связано с различными стадиями зрелости берегов в условиях интенсивного денудационного разрушения берегов морей, характеризующихся продолжительным периодом «открытого моря» при отрицательных температурах воздуха.

Морфоклиматическая позиция (геопространственные параметры и связанные с ними различия морфолитодинамических показателей) о-ва Сахалин и островодужных систем Северной Пацифики позволили нам рассматривать их как контактные зоны морей разного типа, а также морей и океанов.

Морфолитодинамические характеристики берегов контактных зон наряду с особенностями гидродинамики и термического режима разделяемых акваторий определяют также и морфоклиматические параметры собственно контактной зоны.

Сахалинские берега умеренно холодной северной части Японского моря и субарктического Охотского моря расположены друг от друга в 30–140 км, в то время

как океанские и морские берега крупных островов в островодужных системах разделяют первые километры. Таким образом, ветроволновые поля и их взаимодействие с волнами зыби в контактных зонах имеют весьма сложный характер. Температурный режим побережий также в значительной степени зависит от геопространственных параметров контактных зон.



**Рисунок 2.** Распределение морфогенетических типов берегов о. Сахалин и островодужных систем Северной Пацифики: 1 - с ледниково-тектоническим расчленением (фиордовые), тектонически обусловленные, 2 - абразионно-денудационные; 3 - абразионные (выровненные и бухтовые); 4 - абразионные отмершие; 5 - термоабразионные и ледовые; 6 - абразионно-аккумулятивные (выровненные и бухтовые); 7 - созданные волновыми процессами, пляжевые; 8 - созданные волновыми процессами, лагунные, а-Алеутская островная дуга (км), б- Алеутская островная дуга (% от общей протяженности берегов), в-Курильская островная дуга(км), г- Курильская островная дуга (% от общей протяженности берегов), д - о. Сахалин (км), е - о. Сахалин дуга (% от общей протяженности берегов).

В результате оцифровки и последующего анализа карт морфогенетических типов берегов Японского, Охотского и Берингова морей было наглядно продемонстрировано своеобразие современного состояния берегов этих морей. Полученные распределения типов берегов с морской и океанской стороны островодужных систем послужили отправным моментом при актуализации проблемы особенностей развития берегов линейных контактных зон, разделяющих морские бассейны, а также моря и океаны. Морфометрические исследования в комплексе с данными геолого-геоморфологического анализа подтвердили специфику развития и современной динамики морских и океанских берегов островодужных систем. Предполагается, что продольная асимметрия низменных перешейков между океанскими и морскими берегами обусловлена цунамигенными процессами.

### Литература / References:

1. Бакланов П.Я. Географические и геополитические факторы в региональном развитии // Региональные иссл. 2014. №2. С. 4–10.
2. Лихачева Э.А., Маккавеев А.Н., Локшин Г.П. Физическая сущность геоморфологических границ // Геоморфология. 2010. № 2. С. 3–10
3. Скрыльчик Г.П. Основные уровни устойчивости в общей организации геосистем Земли // Успехи Совр. Естествозн. 2017. № 11. С. 101–106.
4. Лихачева Э.А., Тимофеев Д.А. Анализ геоморфологических систем: основные понятия // Геоморфол. 2008. № 2. С. 14–21

5. Лихачева Э.А., Тимофеев Д.А. К иерархии геоморфологических систем с позиций их организованности // Геоморфол. 2007. № 4. С. 3–8.



## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДНЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОГРАФИИ ОКЕАНА, ПОСТРОЕННОЙ РАЗЛИЧНЫМИ МОДЕЛЯМИ**

**В.В. Багатинская<sup>1</sup>, В.А. Багатинский<sup>1</sup>, С.А. Лебедев<sup>2</sup>, Н.А. Дианский<sup>1,3,4</sup>**

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup> Геофизический центр РАН, Москва

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва

<sup>4</sup> Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва

Спутниковая альтиметрия [1] относится к одному из активных методов дистанционного зондирования Земли с борта космического аппарата. В первую очередь спутниковая альтиметрия направлена на решение геодезических задач – определение высот морского геоида, который по определению является эквипотенциальной поверхностью гравитационного поля Земли, совпадающей с невозмущенной поверхностью океана [2]. Отклонение морской поверхности с учетом высот приливов от геоида называется динамической топографией (ДТ). Средняя динамическая топография определяется как отклонение средней высоты морской поверхности от высоты геоида и рассчитывается по данным спутниковой альтиметрии, дрейфующих буев и результатам расчетов по термогидродинамическим моделям [3]. Различают глобальные [4–6] и региональные [7] модели среднеклиматической ДТ.

Представленная работа посвящена изучению важной проблемы – определению и уточнению высот морского геоида. Одним из путей решения этой проблемы является, оценка и сравнение средней динамической топографии (СДТ) Мирового океана, определяемая его общей циркуляцией. Различают три метода построения средней динамической топографии: *прямой, синтетический и комбинированный*.

В работе проводился сравнительный анализ СДТ Мирового океана, построенной различными эмпирическими глобальными моделями CNES-CLS13 [4], MDOT APDRС 2014 [5] и DTU15MDT [6]. Был также опробован новый метод расчета СДТ и скорости течений на основе модели общей циркуляции океана INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Для оценки качества глобальных моделей СДТ проводилось сравнение выше описанных моделей для всего Мирового океана, а для более детального рассмотрения - на акватории Балтийского моря.

Было показано, что в современных моделях разброс по акватории Мирового океана в СДТ достигает от -50 до +30 см. В целом результаты по INMOM укладываются в этот диапазон расхождений. Большой разброс в СДТ говорит о еще нерешенных проблемах его вычисления и проблема точного определения СДТ остается открытой. Следует отметить, что течения Мирового океана лучше всего воспроизводятся моделью INMOM, так как в ней нет проблем с расчетом течений на экваторе, как в остальных моделях СДТ. Таким образом предложенный метод определения СДТ с помощью модели общей циркуляции океана представляется перспективным.

*Работа выполнена в рамках госзаказа ВМС России «обзор и сравнение современных моделей средней динамической топографии океана», а также при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках научного проекта № 18-05-01107.*



## Литература / References:

1. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия в науках о Земле // Совр. Пробл. Дистанц. Зондир. Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 33–49.
2. Пеллинен Л.П. Высшая геодезия. М.: Недра, 1985. 128 с.
3. Tapley B.D., Kim M.C. Applications to Geodesy // Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications. San Diego: Academic Press, 2001. pp. 371–406.
4. Rio M.-H., Mulet S., Picot N. Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. pp. 8918–8925. DOI 10.1002/2014GL061773
5. Maximenko N., Knudsen P., Centurioni L., Andersen O., Hafner J., Melnichenko O. New mean dynamic ocean topography derived from a synthesis of satellite altimeter, gravity, and scatterometer data and trajectories of Lagrangian drifters // Ocean Surface Topography Science Team Meeting. 2014. Konstanz, Germany.
6. Andersen O.B., Knudsen P. Deriving the DTU15 Global high resolution marine gravity field from satellite altimetry // In: ESA Living Planet Symp. 2016. Prague, Czech Republic.
7. Лебедев С.А. Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря // Совр. Пробл. Дистанц. Зондир. Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 224–234.



## ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЛАСТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА И ПРОЦЕССОВ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**С.О. Барков**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
Москва, sviatoy97@gmail.com*

В современном мире подземное хранение газа, как одна из подотраслей газовой промышленности, развивается достаточно быстро, поскольку является безальтернативным решением в сглаживании сезонных потреблений газа. В последнее время актуальность подземных хранилищ газа (ПХГ) растет в связи с колебаниями спроса на мировом рынке углеводородов. Отметим, что в Российской Федерации, ввиду сложных климатических условий и большой протяженности страны, ПХГ играют особенно важную роль.

Наиболее распространёнными являются ПХГ трех типов [1]:

- в истощенных газовых, газонефтяных или газоконденсатных полях;
- в водоносных пластах;
- в соляных полостях.

Хранение газа в водоносных пластах является наиболее дорогостоящим по сравнению с другими. Отмечается также недостаточная изученность геологической структуры по сравнению с ПХГ в истощенных структурах. С технической точки зрения наиболее перспективными являются ПХГ в соляных отложениях. Преимуществом таких хранилищ выступает достаточно малое в сравнении с другими видами количество буферного газа – 33%, а также высокие скорости закачки и отбора углеводородов [2].

Главной проблемой при эксплуатации ПХГ в истощенных месторождениях [3] является изменение фильтрационно-емкостных свойств резервуара при периодических циклах закачки и отбора газа, т. е. при периодических изменениях давления в скважине и пласте. Такой режим работы неизбежно приводит к изменению напряженно-деформированного состояния породы пласта-коллектора. Происходит возникновение остаточных деформаций, что сказывается на емкостных и фильтрационных характеристиках пород массива - пористости и проницаемости. Высокие значения этих характеристик являются необходимым условием для создания ПХГ на базе истощенных

месторождений. Однако, породы таких пластов зачастую имеют низкую прочность, что чревато при циклах закачки и отбора газа выносом песка, который разрушает не только саму скважину, но и эксплуатационное оборудование.

Определения коэффициента пористости пород возможно большинством геофизических методов. Способствует этому то, что газы и жидкости, заполняющие поровое пространство пород, в основном обладают резко отличными свойствами по сравнению с физическими свойствами минералов, образующих скелет породы [4]. На данный момент наиболее разработаны технологии измерения удельного сопротивления пород и пластовых вод, а также технологии изучения потенциалов собственной поляризации; методы измерения плотностей надтепловых и тепловых нейтронов и интенсивности рассеянного гаммаизлучения; акустического сигнала и их комбинации [5]. Достаточно широко и с большим успехом применяется метод сопротивлений. Относительная погрешность определения пористости зависит от характера порового пространства, глинистости коллектора и прочих факторов [6]. Для изучения коэффициента проницаемости горных пород могут быть использованы методы сопротивлений, потенциалов вызванной и собственной поляризации пород, а также естественного гамма-излучения. Однако при эксплуатации ПХГ огромную роль играет моделирование именно изменения емкостно-фильтрационных параметров при циклическом изменении напряженно-деформированного состояния пласта-коллектора.

Существует большое число аппаратов для экспериментального определения проницаемости образцов пород нефтяных и газовых пластов. По принципу действия эти аппараты почти не различаются. Различие их заключается только в величинах используемого давления и вида носителя (газ, вода). В одних аппаратах предусматривается определение проницаемости газом, в других – водой, в третьих – водой и газом. Для определения проницаемости пород параллельно и перпендикулярно напластованию из извлеченного керна на сверлильном станке вырезают образцы кубической или цилиндрической формы в зависимости от имеющихся в лаборатории зажимов и аппаратуры. По этой причине указанные аппараты имеют различное конструктивное оформление. В [7] для моделирования условий, в которых находятся породы продуктивных пластов, была проведена серия экспериментов по всестороннему внешнему сжатию цилиндрических образцов песчано-алевритовых пород ПХГ. Испытания, проводимые на песках, показали, что при эксплуатации ПХГ, т. е. при циклически меняющихся значениях эффективного давления возникают остаточные деформации, уменьшается открытая пористость. Уменьшение пористости происходит в основном за счет сокращения количества мезапор, увеличивается доля ультракапиллярных пор и поровых каналов, за счет чего коэффициент проницаемости породы уменьшается. В [8] было проведено моделирование циклического изменения напряженно-деформированного состояния породы в окрестности горизонтальной скважины. Серия экспериментов была проведена на образцах кубической формы при помощи Испытательной системы трехосного независимого нагружения ИПМех РАН (ИСТНН) [9]. Полученные результаты также говорят о том, что в ходе эксплуатации ПХГ возможно значительное уменьшение проницаемости пород массива.

О влиянии циклической эксплуатации на прочность и проницаемость пород скважин ПХГ, также говорится и в работе [10]. Комплексные работы по изучению влияния циклического изменения нагрузки на образцах пород из пласта ПХГ проводились в исследованиях [11,12]. Основным выводом этих работ является утверждение, что при небольших амплитудах изменения пластового давления во время эксплуатации ПХГ его влияние на прочностные характеристики пород незначительно. Таким образом проведенные исследования говорят о необходимости выбора



правильного режима эксплуатации ПХГ, т. е. выбора длительности циклов закачки и отбора углеводородов.

Лабораторные исследования на модельных образцах играют огромную значимость для исследования развития деформационных процессов и изменения емкостно-фильтрационных свойств пород ПХГ. На основе обзора литературных источников стоит также отметить, что до сих пор отсутствует единый общепринятый подход к экспериментальному изучению физико-механических свойств пород-коллекторов и их взаимосвязи с емкостно-фильтрационными свойствами, учитывающий особенности их деформирования и нагружения при подземном хранении газа.

*Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы № АААА-А17-117021310371-9 и частичной поддержке РФФИ, проект № 17-41-590148.*

### **Литература / References:**

1. Смирнов В.И. Строительство подземных газонефтехранилищ. М.: Газойл пресс, 2000. 250 с.
2. Вознесенский Е.А., Филимонов Ю.Л., Пустовойтова Н.А. Задачи геофизических исследований при создании и эксплуатации подземных хранилищ углеводородов // Горн. Информ.-Аналитич. Бюлл. 2014. № 9. С. 70–76.
3. Попков В.И., Соловьев В.А., Соловьева Л.П. Геоэкологические проблемы подземных хранилищ газа (состояние проблемы) // Южно-Росс. Вестн. Геол. Геогр. Глобал. Энергии. 2006. № 8. С. 361–373.
4. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. М.: Недра, 1985. 310 с.
5. Битнер А.К., Прокатень Е.В. Методы исследования пород-коллекторов и флюидов. Красноярск : Сиб. Федер. Ун-т, 2018. 224 с.
6. Геофизические методы исследования скважин. М.: Недра, 1983. 591 с.
7. Голодковская Г.А., Калинин И.В., Филимонов Ю.Л., Хлопцов В.Г. Изменение деформационных и емкостно-фильтрационных свойств песчано-алевритовых пород при эксплуатации подземных хранилищ газа // ВМУ. Сер. 4. Геол. 2008. №3.
8. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Экспериментальное исследование влияния неравнокомпонентного трехосного напряженного состояния на проницаемость горных пород // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 6. С. 39–48.
9. Karev V.I., Kovalenko Yu.F. Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production // True Triaxial Testing of Rocks. "Geomech. Res. Ser." Leiden, 2013. pp. 301–310.
10. Shao J., You L., Kang Y., Chen M., Meng S., Zhang N. Experimental study on stress sensitivity of underground gas storage // J. Petrol. Sci. Eng. 2020. DOI 10.1016/j.petrol.2020.107577
11. Dietl C., Braun R., Baumgartner H., Jahns E., Rudolph T. Complex Petrophysical Studies to Evaluate the Safety of an Underground Gas Storage in Porous Rocks // Search and Discovery Article №80642, 2018.
12. Hu C., Agostini F., Skoczylas F., Egermann P. Effects of gas pressure on failure and deviatoric stress on permeability of reservoir rocks: initial studies on a Vosges sandstone // Europ. J. Envir. Civil Eng. 2016. DOI 10.1080/19648189.2016.1229231



---

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ТЕРРИТОРИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»**

***И.В. Батухтин, А.Н. Беседина, Э.М. Горбунова, С.М. Петухова***

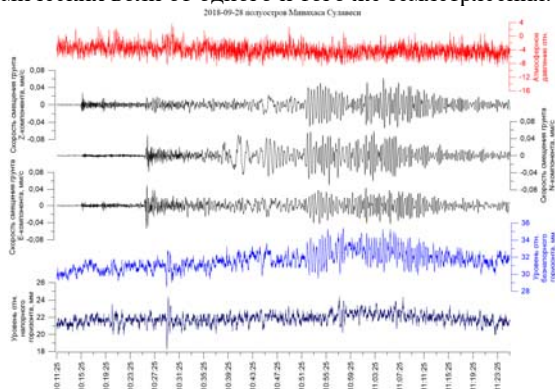
*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва, emgorbunova@bk.ru*

Гидрогеологические эффекты, связанные с прохождением сейсмических волн от удаленных землетрясений, достаточно широко изучены в сейсмоактивных регионах и

рассматриваются в качестве индикаторов динамического деформирования флюидонасыщенных коллекторов [1–5 и др.]. Многолетние наблюдения за реакцией подземных вод на землетрясения позволили выделить основные типы гидрогеологических эффектов: предвестники, косейсмические и постсейсмические изменения уровня. В платформенных условиях прецизионный мониторинг уровня подземных вод проводится на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») с февраля 2008 г. по настоящее время [6]. В двух наблюдательных скважинах установлены прецизионные датчики уровня LMP308i. Точность регистрации уровня с частотой 1 Гц составляет 1.7 мм. Регистрация сейсмических данных ведется широкополосными сейсмометрами STS-2 и СМ-3-Е, установленными в шахте на глубине 20 м, с частотой опроса 100 Гц.

Объектом исследований является карбонатный коллектор порово-трещинного типа неравномерно трещиноватый, в пределах которого преимущественное распространение получают два водоносных горизонта. Верхний безнапорный водоносный горизонт вскрыт в интервале 44.0–56.2 м, нижний напорный - пройден в интервале 92–115 м. Уровни подземных вод залегают на глубине 46 м и 68 м соответственно. Изолированность рассматриваемых водоносных горизонтов и разобщенность уровней обусловлена наличием регионального водоупора – плотных глин с подчиненными прослоями мергеля.

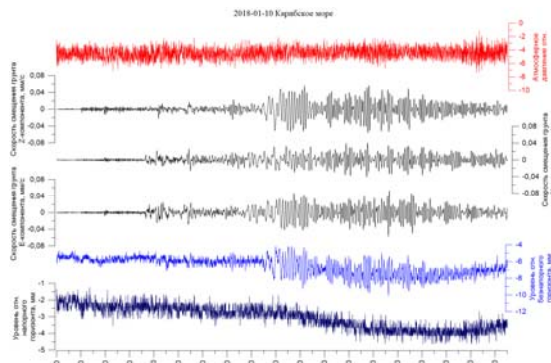
За период наблюдений на территории ГФО «Михнево» зарегистрированы многочисленные гидрогеологические отклики на прохождение сейсмических волн от землетрясений с магнитудами (М) 6.3-9.1 на эпицентральных расстояниях от 1863 до 16507 км. При скорости смещения грунта (по вертикальной компоненте здесь и далее) от 0.06 до 3.78 мм/с амплитуды гидрогеологических откликов безнапорного водоносного горизонта варьируют от 2.2 до 110.6 мм, напорного - от 2.0 до 41.5 мм. При скорости смещения грунта от 0.08 до 0.14 мм/с амплитуды откликов безнапорного и напорного горизонтов имеют близкие значения. В диапазоне зарегистрированных скоростей смещения грунта 0.6-1.3 мм/с различия амплитуд гидрогеологических откликов безнапорного и напорного водоносных горизонтов возрастают на порядок при прохождении сейсмических волн от одного и того же землетрясения.



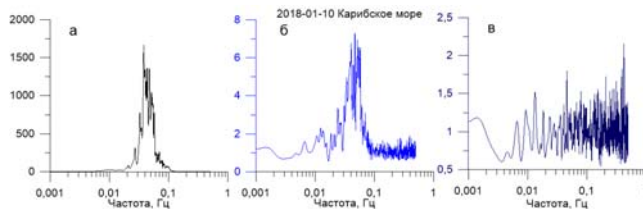
*Рисунок 1. Вариации атмосферного давления, скорости смещения грунта: по Z-, N- и E-компонентам, уровня безнапорного и напорного водоносных горизонтов при прохождении группы сейсмических волн от землетрясения 28.09.2018 М 7.0 полуостров Минахасса, Сулавеси, эпицентральное расстояние 9523 км.*

В процессе обработки экспериментальных данных наряду с косейсмическими

вариациями уровня безнапорного и напорного водоносных горизонтов, связанными с прохождением сейсмических волн от землетрясений (рис. 1), отмечены устойчивые постсейсмические изменения в виде плавного подъема или снижения уровня с различной интенсивностью (рис. 2). Для типизации зарегистрированных гидрогеологических откликов от удаленных землетрясений проводится анализ сейсмических и гидрогеологических данных в высоко- и низкочастотных диапазонах соответственно с периодами более и менее 60 с для 6 часовых интервалов [7]. Косейсмическим вариациям уровня подземных вод, которые различаются по степени проявления в частотном диапазоне, соответствуют I и II типы. Первый тип ограниченно прослеживается только в высокочастотной области или в низкочастотной области, второй – в широком диапазоне частот. Постсейсмические изменения уровня отнесены к III типу.



*Рисунок 2. Вариации атмосферного давления, скорости смещения грунта: по Z-, N- и E-компонентам, уровня безнапорного и напорного водоносных горизонтов при прохождении группы сейсмических волн от землетрясения 10.01.2018 М 6.8 в Карибском море, эпицентрального расстояния 10271 км.*



*Рисунок 3. Спектрограммы отношения модулей спектров скорости смещения грунта (а), уровня безнапорного (б) и напорного (в) водоносных горизонтов после прихода сейсмических волн от землетрясения к фоновым параметрам.*

Сравнение амплитудно-частотных спектров, построенных по сейсмическим и гидрогеологическим данным до и после прихода сейсмических волн от землетрясений, направлено на выделение событий, при которых вариации уровня после землетрясения в 2 и более раз превышают фоновые значения до землетрясения. На нормированных спектрограммах отношения модулей спектров скорости смещения грунта и уровня напорного и безнапорного водоносных горизонтов после прихода волн от землетрясений к фоновым параметрам установлено преимущественно совпадение экстремумов скорости смещения грунта и амплитуд уровня безнапорного водоносного горизонта в области частот 0.03–0.06 Гц (рис. 3). Для ряда отдельных землетрясений

прослежено смещение максимумов амплитудных спектров уровня воды относительно экстремумов скорости смещения грунта соответственно.

В ходе исследования гидрогеологических откликов на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений на территории ГФО «Михнево» получены дополнительные сведения об основных параметрах динамического деформирования флюидонасыщенных коллекторов в платформенных условиях:

- поро-упругое деформирование флюидонасыщенных коллекторов при сейсмическом воздействии регистрируется при скорости смещения грунта от 0.05 мм/с;
- прослеженные постсейсмические вариации уровня, вероятно, свидетельствуют о локальном изменении фильтрационных свойств карбонатного коллектора порово-трещинного типа;
- отмеченные изменения интенсивности спектров после землетрясений и отношений модулей спектров могут быть использованы как для определения нижнего порога чувствительности исследуемого объекта на прохождение сейсмических волн, так и для оценки степени динамического деформирования флюидонасыщенного коллектора.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-05-00809 и № 20-35-90016.*

#### **Литература / References:**

1. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 328 с.
2. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ООО «Камчатпресс», 2019. 144 с.
3. Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. 2011. № 12. С. 50–62.
4. Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.-Y. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // Earth. Planet. Sci. Lett. 2015. V. 430. pp. 66–74.
5. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. 228 p.
6. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А. Динамика деформирования флюидонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод // Динамич. Проц. в геосферах. 2018. Вып.10. С. 74–83.
7. Gorbunova E.M., Besedina A.N. Study of the hydrogeological responses from the far earthquakes // SGEM2019 Conf. Proc. 2019. Is. 1.2. pp. 507–514.



---

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ТЕРМОБАРА ПО АКВАТОРИИ ВОДОЕМА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

***Н.С. Блохина***

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, [blokhinans@gmail.com](mailto:blokhinans@gmail.com)*

Изменения на озерах показали, что на формирование, развитие и местоположение термобара огромное влияние оказывают гидрометеорологическая ситуация, форма, размеры и рельеф дна озёрной котловины.

В работе с помощью математической модели получены зависимости скорости распространения весеннего термобара в озере с учетом глубины и наклона его дна при разных метеорологических ситуациях. Это позволило, используя количественные

характеристики подводного рельефа дна Ладожского озера построить изолинии пространственно-временной изменчивости местоположения ТБ по акватории водоема.

Для решения поставленной задачи исследовалось движение вязкой несжимаемой жидкости в двумерной прямоугольной области с наклонной правой границей. Решалась система уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска и уравнение теплопроводности с учетом аномальной зависимости плотности пресной воды от температуры в районе 4°C. На дне водоема и правой наклонной боковой границе задавали условия прилипания и непроницаемости для скорости и отсутствия потока тепла соответственно. На левой границе - условие симметрии для всех переменных. На верхней границе задавали условие свободной поверхности для скорости и тепловой поток, состоящий из явного и скрытого потоков тепла, прямой солнечной радиации, длинноволнового излучения. Задача решалась численно.

Рассматривались водоёмы глубиной  $H$  от 8 м до 192 м и шириной  $L_l=4000$  м (половина водоёма). Угол наклона дна водоема  $\alpha$  изменялся от 0.715° до 11.44°. Температура атмосферы принималась равной  $T_a=20^\circ\text{C}$ , а относительная влажность воздуха  $f=60$  и 95 %. Поток прямой солнечной радиации, поступающий на поверхность водоема равнялся  $Q_R=350, 500, \text{ и } 700$  Вт/м<sup>2</sup>.

В результате расчетов были получены скорости перемещения термобара для разных глубин водоема и углов наклона прибрежной зоны. Выявлены три характерных интервала изменения скорости  $V$  в зависимости от этих параметров. Показано, что основное влияние на распространение ТБ оказывает глубина водоема. Увеличение относительной влажности воздуха и потока радиации от Солнца  $Q_R$  способствуют увеличению скорости его распространения. Однако существует минимальные значения  $Q_R$  (различные для водоемов разной глубины) ниже которых ТБ не развивается.

Используя данные о распределении глубин и углов наклона дна и результаты расчетов скорости перемещения весеннего ТБ, построены изолинии положения зоны термобара (изотермы 4°C) на поверхности Ладожского озера. Получено хорошее качественное согласие результатов моделирования и натуральных наблюдений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-01-6363)*



---

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТРЕЩИНЫ ГРП В ПОРОУПРУГОЙ СРЕДЕ В РАМКАХ ТРЕХМЕРНОЙ САМОСОГЛАСОВАННОЙ ПОСТАНОВКИ**

***В.Е. Борисов, А.И. Иванов, Б.В. Критский, Е.Б. Савенков, Е.В. Зипунова***  
*ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, boris.v.kritskiy@gmail.com*

Настоящая работа посвящена описанию опыта разработки математического моделирования (математические модели, вычислительные алгоритмы и комплекс программ) для анализа процесса развития флюидонаполненных трещин в порупругой среде, в частности - трещин гидроразрыва пласта. Технология гидроразрыва (ГРП) заключается в закачке в нефтеносный пласт специальной жидкости с целью создания искусственной (техногенной) трещины длиной ~100 м, высотой ~10 м и средним раскрытием ~5 - 10 мм). В результате создается соединенный со скважиной искусственный канал с большой площадью притока. Он имеет высокую, на порядки превышающую пластовую, проницаемость. Это обеспечивает значительное увеличение притока пластового флюида к скважине [1]. Создание трещины гидроразрыва является

экономически дорогим и технически сложным процессом. По этой причине важным является обоснование применимости технологии в случае каждой отдельной скважины. Для этого необходимо оценить возможность создания трещины с заданными параметрами с учетом влияния свойств напряженно-деформированной среды на процесс развития трещины, ее конечные геометрические и фильтрационные характеристики, в том числе траекторию.

Полноценное решение этих задач в настоящее время доступно только средствами математического моделирования. По этой причине анализу и математическому моделированию процесса развития флюидонаполненной трещины уделяется большое внимание. Это относится как к теоретическому анализу процесса с точки зрения механики сплошной среды, так и к разработке вычислительных алгоритмов и программ, пригодных для прикладного анализа.

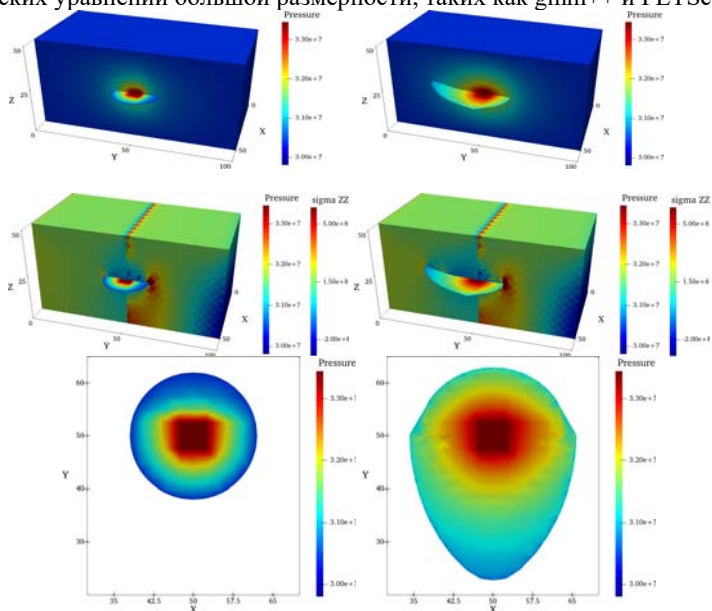
В соответствии с общепринятыми представлениями нефтеносный пласт представляет собой пористую среду, пустотное пространство которой заполнено жидкостью. Процессы деформации пласта и фильтрации флюида в нем происходят совместно, согласованным образом и не могут быть рассмотрены независимо. Совокупность процессов, сопровождающих и влияющих на процесс роста флюидонаполненной трещины в пороупругой среде включает в себя следующие:

- эволюция полей давления флюида и напряженно-деформированного состояния вмещающей трещину среды в ходе развития трещины и изменения состояния флюида в ней;
- течение жидкости в пустотном пространстве трещины, которое представляет собой тонкий слой с априорно неизвестными геометрическими параметрами;
- геометрическая эволюция срединной поверхности трещины, обусловленная как состоянием флюида внутри нее, так и полями давления и напряжений во вмещающей трещину среде.

В [2-9] были предложены математическая модель и комплекс вычислительных алгоритмов для решения указанной задачи. Разработанная новая трехмерная самосогласованная математическая модель развития флюидонаполненной трещины в пороупругой среде модель учитывает все основные механизмы, сопровождающие развитие трещины, включая пороупругие эффекты в среде и течение в трещине с самосогласованным учетом потоков консервативных величин между ними. Развитие трещины описывается с минимальными ограничениями на геометрию ее срединной поверхности и с использованием физически обоснованных критериев развития трещины. Для описания динамики срединной поверхности трещины используется ее неявное представление на основе метода проекции ближайшей точки. Для численного решения задачи в пороупругой среде используется оригинальный вариант «расширенного» метода конечных элементов - X-FEM/CP. Алгоритм решения полной связанной задачи является чисто эйлеровым, использует единое представление поверхности для решения задачи во вмещающей трещину пороупругой среде и течения в трещине. Для построения конечномерных аппроксимаций используется единая заданная в пространстве эйлерова расчетная сетка, без использования расчетной сетки, заданной на срединной поверхности трещины.

Разработанный на основе предложенных миделей и алгоритмов программный комплекс имеет модульную структуру и включает в себя отдельные расчетные модули для решения задач упругости, фильтрации, течения в трещине и расчета ее геометрической эволюции. Модули расчета задач фильтрации и теории упругости имеют возможность использовать различные конечные элементы. Реализация метода XFEM/CP позволяет проводить расчет с заданными динамическими и кинематическими

граничными условиями на срединной поверхности трещины. Модули расчета задач фильтрации и теории упругости могут использоваться независимо или быть объединены в модуль решения задачи пороупругости. При использовании последнего могут расчет может проводиться в рамках слабо связанной постановки, или в рамках итерационного связывания до сходимости решения полной связанной задачи. Вычислительный комплекс реализован на языке C++. Для достижения лаконичности и обеспечения его функциональности широко использованы методы программирования языка шаблонов C++ . Программная реализация имеет универсальный интерфейс для использования различных библиотек решения разреженных систем линейных алгебраических уравнений большой размерности, таких как gmm++ и PETSc.



*Рисунок 1. Моделирование развития флюидонаполненной трещины в неоднородной пороупругой среде. Сверху вниз: поле давления в среде, вертикальная компонента поля напряжений, профиль трещины. Правый столбец: начальный момент времени, левый - конечный момент времени.*

Пример расчета динамики развития трещины приведен на рис. 1. Трещина расположена в области, которая имеет форму параллелепипеда. В начальный момент времени она является плоским радиусом 20 метров. Распределение упругих, фильтрационных и прочностных свойств среды является неоднородным. Нижняя граница расчетной области закреплена. На верхней заданы сдвиговые нормальные напряжения. В центре трещины задано фиксированное давление, превышающее давление флюида в области. Развитие трещины происходит в естественном поле напряжений. На рисунке показано давление и одна из компонент тензора напряжений в области, а так же давление в трещине в начальный и конечный момент времени расчета.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-01-00582А.*

#### **Литература / References:**

1. Салимов В.Г., Ибрагимов Н.Г., Насыбуллин А.В., Салимов О.В. Гидравлический разрыв



карбонатных пластов. М.: Нефтяное хозяйство, 2013. 471 с.

2. Борисов В.Е., Иванов А.В., Критский Б.В., Меньшов И.С., Савенков Е.Б. Численное моделирование задач пороупругости // Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 81.
3. Borisov V., Ivanov A., Kritsky B., Menshov I., Ramazanov M., Savenkov E. Fully coupled numerical simulation techniques for 3D hydraulic fracturing // IOP Conf. Series. 2018. 1141. 012085.
4. Савенков Е.Б., Борисов В.Е. Математическая модель развития трещины гидроразрыва пласта в трехмерной пороупругой среде // Вестн. Перм. Нац. Иссл. Политех. Ун-та. Механика. 2018. № 1. С. 5–17.
5. Ramazanov M.M., Borisov V.E., Kritsky B.V., Savenkov E.B. Fracture Growth Criterion for Poroelastic Media // AIP Conf. Proc. 2018. 2051. 020250.
6. Рамазанов М.М., Критский Б.В., Савенков Е.Б. Формулировка J-интеграла для модели пороупругой среды Био // Инж.-физич. журнал. 2018. Т. 91 (6). С. 1677–1684.
7. Рамазанов М.М., Савенков Е.Б. Критерий развития трещин в пороупругой среде // Вест. МГТУ им. Баумана. Сер. Естеств. Науки. 2018. № 5(80). С. 65–82.
8. Борисов В.Е., Критский Б.В., Савенков Е.Б. Представление поверхности с помощью проекции ближайшей точки в методе X-FEM // Математич. Моделир. 2019. Т. 31 (6). С. 18–42.
9. Zipunova E., Ivanov A., Savenkov E. Application of the closest point projection method to solution of Reynold's lubrication equations on evolving surfaces // Math. Montisnigri. 2020. V. XLVII.



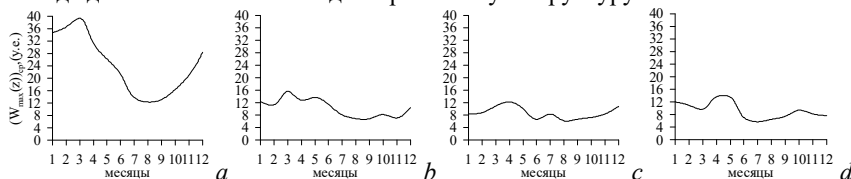
## ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СВОБОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В МОРЯХ РУССКОЙ АРКТИКИ

*А.А. Букатов, Н.М. Соловей, Е.А. Павленко*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, ne.le.7@hotmail.com*

Выполнено исследование фазовых характеристик и вертикальной структуры свободных внутренних волн (ВВ) в Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях.

По данным реанализа World Ocean Atlas 2018 о температуре и солености за период 1955–2018 гг. с разрешением  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  рассчитывалась плотность. В каждом узле сетки рассчитывались профили частоты плавучести, определялся максимум частоты плавучести по глубине и глубина его залегания. Исследование внутренних волн проводилось исходя уравнений движения непрерывно стратифицированной жидкости в линейном приближении. Рассчитаны собственные частоты, собственные периоды и амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды внутренних волн, т.к. первая мода даёт наибольший вклад в вертикальную структуру пакета волн.



*Осреднённый по акватории моря максимум амплитуды вертикальной составляющей скорости первой моды свободных внутренних волн в морях: а) Баренцево, б) Карское с) Лаптевых, д) Восточно-Сибирское.*

Анализ зависимости фазовых характеристик ВВ от изменчивости стратификации показал, что в месяцы максимальных градиентов плотности наблюдаются самые высокочастотные и самые короткопериодные ВВ. Во внутригодовом цикле в



Баренцевом море максимум осреднённой по акватории моря частоты плавучести по глубине достигает наибольших значений в июле и августе, в Карском море – с июля по сентябрь и в ноябре, в море Лаптевых – в июне и октябре, в Восточно-Сибирском море – в июле. В эти же месяцы наблюдаются максимальные значения собственных частот, минимальные значения собственных периодов и максимумов амплитуд вертикальной составляющей скорости внутренних волн.

Самые высокочастотные и короткопериодные волны отмечаются в морях Карском и Лаптевых, что связано с большим объёмом материкового стока в эти моря.

Наиболее интенсивная динамика вод наблюдается в месяцы наименьших градиентов плотности: в Баренцевом и Карском морях – в марте, в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море – в апреле.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0003.*

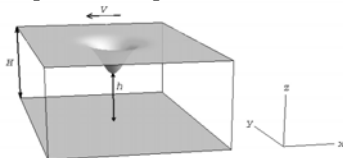


## **ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ОТ ДВИЖУЩЕГОСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЫ НЕЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ВОЗМУЩЕНИЙ**

***В.В. Булатов, Ю.В. Владимиров***

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва,  
internalwave@mail.ru, vladimiyura@yandex.ru*

Важным механизмом возбуждения внутренних гравитационных волн (ВГВ) в природных (океан, атмосфера Земли) и искусственных стратифицированных средах является их генерация источниками возмущений различной физической природы: естественного (движущиеся возмущения атмосферного давления, обтекание неровностей рельефа океана, подветренные горы) и антропогенного (морские технологические конструкции, схлопывание области турбулентного перемешивания, подводные взрывы) характеров [1-7]. В частности, касательное напряжение ветра, создаваемое движущимся ураганом, может формировать на океанической поверхности структуру в виде движущейся воронки с почти радиальной симметрией. Как показывают результаты мониторинга Мирового океана, движущиеся возмущения морской поверхности являются одним из основных природных механизмов генерации интенсивных ВГВ. Распространение диспергирующих ВГВ в стратифицированных средах и создаваемые ими волновые картины на больших расстояниях от источников возмущений (много больших его характерных размеров) практически не зависит от их формы и определяется только законом дисперсии и скоростью источника. Целью настоящей работы является построение аналитических решений, описывающих дальние поля ВГВ, возбуждаемых движущимся нелокальным модельным источником возмущений в слое стратифицированной среды конечной толщины.



*Рисунок 1. Геометрия задачи.*

**Постановка задачи.** Рассматривается задача о полях ВГВ, возникающих при

движении нелокального источника возмущений в слое вязкой несжимаемой вертикально стратифицированной среды толщины  $H$ . Источник движется на поверхности среды с постоянной скоростью  $V$  в горизонтальном направлении оси  $x$ , ось  $z$  направлена вверх, форма нелокального источника описывается функцией  $s(x, y)$ , максимальная высота источника возмущений равна  $h$ . На рис. 1 представлена геометрия рассматриваемой задачи. Рассматривается установившийся режим волновых колебаний. В движущейся системе координат и в приближении Буссинеска имеем следующее уравнение, для малых возмущений вертикальной компоненты скорости  $W(x, y, z)$  [1-5]

$$V^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \Delta + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) W + N^2(z) \Delta W = 0, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad N^2(z) = -\frac{g}{\rho_0(z)} \frac{d\rho_0(z)}{dz},$$

где  $N^2(z)$  – квадрат частоты Брента-Вейсяля (частоты плавучести),  $\rho_0(z)$  – невозмущенная плотность среды,  $g$  – ускорение свободного падения. Линеаризованное граничное условие на поверхности имеет вид:  $W = V \partial s(x, y) / \partial x$  при  $z = 0$ , на дне используется условие непротекания:  $W = 0$  при  $z = -H$ .

**Основные результаты.** Решена задача о построении аналитических решений, описывающих генерацию ВГВ вдали от нелокального источника возмущений, который движется на поверхности стратифицированной среды конечной глубины. Использовано модельное распределение формы источника, обладающее радиальной симметрией, которое качественно верно описывает основные пространственно-временные характеристики природных источников генерации ВГВ в океане. Полученное решение представляет собой сумму волновых мод. Решения имеет вид ряда по собственным функциям основной спектральной задачи уравнения внутренних гравитационных волн. Приведены результаты численных расчетов компонент горизонтальной скорости дальних полей ВГВ. Дальние поля ВГВ на больших расстояниях от движущегося нелокального источника (много больших его размеров) определяется законом дисперсии и скоростью источника. Полученные результаты позволяют оценивать вариации донного давления на морском дне, что важно для разработки методов регистрации ВГВ в Мировом океане [6, 7]. В дальней зоне возбуждаемые волновые поля относительно малы по амплитуде и, как правило, хорошо описываются с помощью линейных уравнений, поэтому при исследовании дальнего распространения ВГВ прямые численные расчеты нецелесообразны. Аналитические представления дальних полей ВГВ описываются сравнительно простыми аналитическими выражениями.

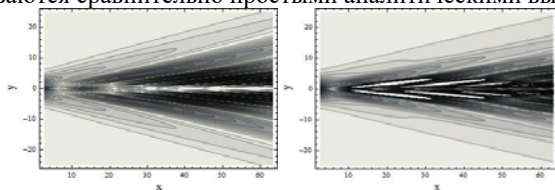


Рисунок 2. Внутренние гравитационные волны на различных глубинах.

Начальные и граничные условия для конкретных нелокальных движущихся источников возмущений должны определяться из результатов прямого численного моделирования полной системы уравнений гидродинамики или из сугубо оценочных полуэмпирических соображений, позволяющих адекватно аппроксимировать реальные нелокальные источники возмущений некоторой системой модельных источников.

Полученные решения дают возможность эффективно рассчитывать основные амплитудно-фазовые характеристики возбуждаемых дальних полей ВГВ, и, кроме того, качественно анализировать полученные решения, что важно для правильной

постановки более сложных математических моделей волновой динамики реальных природных стратифицированных сред (океан, атмосфера Земли). Модельные решения позволяют в дальнейшем получить представления волновых полей с учетом реальной изменчивости и нестационарности этих сред. На рис. 2 приведены результаты расчетов модуля скорости ВГВ на различных глубинах.

*Работа выполнена по гранту РФФИ № 20-01-00111А.*

### **Литература / References:**

1. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Динамика негармонических волновых пакетов в стратифицированных средах. М.: Наука, 2010. 470 с.
2. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Волны в стратифицированных средах. М.: Наука, 2015. 735 с.
3. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Теория волновых движений неоднородных сред. Киров: Междунар. центр научно-иссл. проектов, 2017. 580 с.
4. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Новые задачи математической теории поверхностных волновых возмущений. Киров: Междунар. центр научно-иссл. проектов, 2017. 318 с.
5. Bulatov V.V., Vladimirov Yu.V. A general approach to ocean wave dynamics research: modelling, asymptotics, measurements. М.: Онто-Принт, 2019. 587 с.
6. Morozov E.G. Oceanic internal tides. Observations, analysis and modeling. Berlin, Springer, 2018. 317 p.
7. Velarde M.G., Tarakanov R.Yu., Marchenko A.V. (Eds.). The ocean in motion. Springer Oceanography. Berlin, Springer Int. Publ. AG, 2018. 625 p.



---

## **ИЗМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ МОРСКОЙ В ЗОНАХ СЛИК-РЯБЬ**

***В.М. Бурдюгов***

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, burdyugov@mail.ru*

Одним из визуальных проявлений на морской поверхности процессов, протекающих в атмосфере и океане, является появление сликов. Слик – это области, где коротковолновые составляющие спектра ветровых волн частично или полностью подавлены. Как правило, они наблюдаются при скорости ветра менее 5–7 м/с. Слабые ветра наиболее благоприятны для мониторинга изменений структуры морской поверхности, вызванных такими физическими процессами как внутренние волны, циркуляция Ленгмюра, загрязнение поверхностно-активными веществами и др. В настоящее время исследование шероховатости морской поверхности при слабом ветре является одной из актуальных задач геофизики [1].

Измерение уклонов, которые создают коротковолновые составляющие волнового поля, осуществляется неконтактными методами. Используются приборы, принцип работы которых основан на разных физических эффектах: отражение от морской поверхности электромагнитных волн оптического диапазона [2, 3], преломление луча света на границе вода-воздух [4, 5].

Если в исследуемой области морской поверхности одновременно присутствуют зоны сликов и зоны ряби, то по данным дистанционного зондирования сложно разделить эти зоны и определить статистические характеристики в каждой из них. Такая задача была решена путем измерений уклонов с помощью лазерного уклономера в зонах ряби и сликов, созданных внутренними волнами [4]. Схематично изменение полной дисперсии  $\sigma^2$  (сумма дисперсий ортогональных компонент уклона) в зонах изменения шероховатости, обусловленных внутренними волнами, представлено на рис. 1.

При низких скоростях ветра рябь на морской поверхности отсутствует (штилевой слик). С усилением ветра (точка  $\alpha$ ) появляются зоны ряби. В тоже время, уровень

шероховатости в зонах сликов остается практически постоянным. После того как скорость ветра превышает некое критическое значение, соответствующее точке  $\beta$ , уровень шероховатости в зоне слика начинает расти. Важно отметить, что скорость изменения дисперсии уклонов (чувствительность к изменению скорости ветра) в зоне слика и в зоне ряби между сликами примерно равны. При слабом ветре эта чувствительность существенно выше, чем при ветровом волнении, когда скорости ветра превышает 5–7 м/с [5]. Положение точек  $\alpha$  и  $\beta$  на оси абсцисс является условным. Оно зависит от ряда факторов, в частности от уровня загрязнения морской поверхности и от вариаций скорости поверхностного течения, вызванных внутренними волнами.

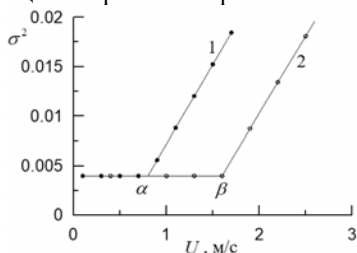


Рисунок 1. Схематичное описание изменений полной дисперсии уклонов  $\sigma^2$  в зонах ряби (кривая 1) слика (кривая 2) при изменении скорости ветра  $U$ .

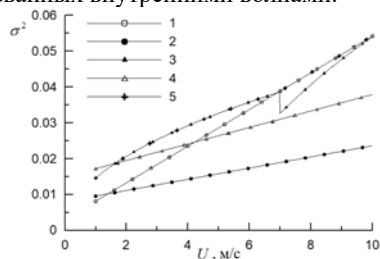


Рисунок 2. Зависимости полной дисперсии уклонов морской поверхности  $\sigma^2$  от скорости ветра  $U$ .

Полученные по данным дистанционного зондирования в оптическом диапазоне зависимости дисперсии  $\sigma^2$  от скорости ветра представлены на рис. 2. Кривые 1 и 2 построены по данным об уклонах, полученных с помощью аэрофотографий морской поверхности [2]. Кривая 1 соответствует чистой воде, кривая 2 соответствует искусственному слику, созданному разливом смеси поверхностно-активных веществ. При изменении метеоусловий от штиля до сильного ветра изменения  $\sigma^2$  с ростом скорости ветра происходят нелинейно. Уточненная регрессионная зависимость (кривая 3) для данных, полученных в [2], представлена в работе [6]. Кривая 4 и 5 построены по данным радиометрических измерений [7] и лазерного зондирования [3] с.

Качественно представленные на рис. 2 зависимости дисперсии от скорости ветра подобны. Заметные количественные отклонения, вероятно, связаны с методическими ограничениями возможности определения статистических моментов уклонов по данным дистанционного зондирования [8]. В отличие от природных сликов в искусственном слике скорость изменения уровня шероховатости с усилением ветра ниже чем в области ряби. Это обусловлено тем, что разные физические механизмы по-разному трансформируют тонкую топографическую структуру морской поверхности, определяющую характеристики отраженного электромагнитного поля в оптическом диапазоне [9].

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений»*

### Литература / References:

1. Карев В.И., Показеев К.В., Чаплина Т.О. Актуальные проблемы моделирования процессов в геосредах // Процессы в геосредах. 2018. №1(14). С. 818–822.
2. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Optical. Soc. America. 1954. V. 44 (11). pp. 838–850.
3. Hu Y., Stamnes K., Vaughan M., Pelon J., Weimer C., Wu D., Cisewski M., Sun W., Yang P., Lin B., Omar

- A., Flittner D., Hostetler C., Trepte C., Winker D., Gibson G., Santa-Maria M. Sea surface wind speed estimation from space-based lidar measurements // Atmos. Chem. Phys. 2008.V. 8. pp. 3593–3601. DOI 10.5194/acp-8-3593-2008
4. Христофоров Г.Н., Запелалов А.С., Бабий М.В. Измерения параметров шероховатости морской поверхности при переходе от шторма к ветровому волнению // Изв. РАН. ФАО. 1992. Т. 28 (4). С. 424–431.
  5. Zapevalov A.S. Statistical characteristics of the moduli of slopes of the sea surface // Soviet J. Phys. Oceanogr. 2002. V. 12 (1). pp. 24–31.
  6. Wu J. Mean square slopes of the wind-disturbed water surface, their magnitude, directionality, and composition // Radio Sci. 1990. V. 25. pp. 37–48.
  7. Li L., Fukushima H., Suzuki K., Suzuki N. Optimization of Cox and Munk sun-glint model using ADEOS/II GLI data and SeaWinds data // Coastal Ocean Remote Sensing. Proc. SPIE. 2007. V. 6680. 668006. DOI 10.1117/12.732779
  8. Запелалов А.С. Определение статистических моментов уклонов морской поверхности оптическими сканерами // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30 (9). С. 789–793.
  9. Христофоров Г.Н., Запелалов А.С., Смоллов В.Е., Фельдман Ю.Р. Лазерная локация топографических неоднородностей на шероховатой морской поверхности // Мор. Гидрофизич. Журн. 1993. № 6. С. 64–73.



---

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЪЕДИНЕННЫХ МОДЕЛЕЙ WRF И LAKE**

*Д.С. Гладских<sup>1,2,3</sup>, А.М. Кузнецова<sup>1</sup>, Г.А. Байдаков<sup>1</sup>, Ю.И. Троицкая<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, [imnyaginaam@yandex.ru](mailto:imnyaginaam@yandex.ru),  
[daria.gladskih@gmail.com](mailto:daria.gladskih@gmail.com)*

<sup>2</sup> *Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва*

<sup>3</sup> *Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва*

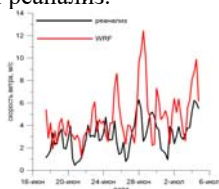
В настоящее время в мире широко применяются программные комплексы для расчета гидрологических характеристик озер и водохранилищ, основанные на одномерных моделях, поскольку они демонстрируют высокую точность воспроизведения температурного распределения и не требуют высоких вычислительных мощностей и существенных временных затрат на расчет, в отличие от полных трехмерных моделей. В программном комплексе LAKE [1] и его модифицированном авторами настоящей работы варианте [2] реализована возможность численного моделирования температурного профиля по всей глубине водоема и на временных интервалах, полностью охватывающих период от вскрытия льда на водоеме до замерзания и составляющих около полугода. Подобные результаты представляют интерес для практически значимых метеорологических задач (например, задач прогнозирования).

При этом необходимо отметить, что в работах российских и зарубежных авторов [3–6], посвященных моделированию термодинамики водных объектов, в качестве входных данных метеорологических условий используются результаты специальных натурных измерений, что требует наличия постоянно функционирующей аппаратуры. Другой подход основан на использовании данных глобального метеорологического реанализа NCEP/NCAR, находящихся в открытом доступе. Однако, поскольку эти данные обладают низким пространственным разрешением, необходимо проводить их

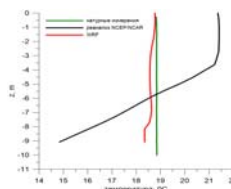
сопоставление с натурными измерениями, и вводить специальный поправочный коэффициент для каждого рассматриваемого водоема, что было продемонстрировано в [2]. Более универсальным подходом является объединение атмосферных моделей с одномерными моделями озер: подобный подход также широко используется в мировых исследованиях [7–9]. В [10] рассматривается применение подобной объединенной модели к водохранилищу Нуожаду на юго-западе Китая.

В целях прогнозирования температурной стратификации различных водных объектов без привлечения дополнительных натурных измерений была выполнена модификация, в рамках которой значения скорости ветра, полученные с помощью атмосферной модели Weather Research & Forecasting (WRF) [11], поступают в качестве входных данных в модель LAKE. Для верификации объединенного программного комплекса были использованы данные натурных измерений, проведенных на Горьковском водохранилище летом 2019 г. [12].

Скорость ветра является одной из важнейших характеристик, влияющих на процессы перемешивания в озерах. Именно скоростью ветра определяется температура и толщина эпимимния — верхнего перемешанного слоя озера. Корректные данные о ветре, особенно для высоких скоростей, критически важны для воспроизведения режимов сильного перемешивания, часто наблюдаемых во внутренних водоемах. Как было сказано ранее, значения скорости ветра можно получить и использованием результатов натурных измерений, из данных глобального метеорологического реанализа NCEP/NCAR, а также с применением атмосферной модели WRF к региону, содержащему рассматриваемую акваторию [13]. В начале было проведено сопоставление данных о скорости ветра из реанализа и модели WRF. Рис. 1 демонстрирует, что расчеты с помощью WRF воспроизводят гораздо более сильные ветры, чем реанализ.



*Рисунок 1. Сопоставление значений скорости ветра, полученных из данных глобального метеорологического реанализа NCEP/NCAR и с помощью расчетов моделью WRF.*



*Рисунок 2. Сопоставление температурных профилей, полученных с помощью CTD-зонда в Горьковском водохранилище, а также с помощью модели LAKE, где в качестве данных о скорости ветра использовались данные реанализа без поправочного коэффициента и результаты расчетов моделью WRF.*

Далее были проведены расчеты с применением модели LAKE. В одном случае в качестве скорости ветра были использованы данные реанализа без поправочного коэффициента. В другом случае использовались результаты моделирования с применением WRF. Полученные в ходе расчетов температурные профили были сопоставлены с профилем, измеренным с помощью CTD-зонда в Горьковском водохранилище. Рис. 2 демонстрирует, что объединение LAKE и WRF позволяет воспроизводить режимы сильного перемешивания ввиду корректных данных скорости приводного ветра, что позволит широко применять данный комплекс моделей для

расчета и прогнозирования термических режимов водных объектов.

*Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 18-05-00292 и 20-05-00776.*

### **Литература / References:**

1. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9 (5). pp. 1977–2006.
2. Сергеев Д.А., Гладских Д.С., Байдаков Г.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. О моделировании термических режимов внутренних водоемов с использованием данных глобального метеорологического реанализа на примере Горьковского водохранилища // *Метеорол. Гидрол.* 2020. № 4. С. 104–112.
3. Пуклаков В.В., Гречушникова М.Г. Термический режим московских водохранилищ // *Метеорол. Гидрол.* 2001. № 12. С. 70–78.
4. Пуклаков В.В., Ершова М.Г., Гречушникова М.Г. Математическое моделирование внутриводоемных процессов в водохранилище // *Пробл. Гидрол. Гидроэкол.* 1999. Вып. 1. С. 302–317.
5. Stepanenko V.M., Martynov A., Jöhnk K.D., Subin Z.M., Perroud M., Fang X., Beyrich F., Mironov D., Goyette S. A one-dimensional model intercomparison study of thermal regime of a shallow, turbid midlatitude lake // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6. pp. 1337–1352. DOI 10.5194/gmd-6-1337-2013
6. Abbasi A., Annor F.O., Giesen N.V. Investigation of temperature dynamics in small and shallow reservoirs, case study: Lake Binaba, Upper East Region of Ghana // *Water.* 2016. V. 8(3). pp. 84. DOI 10.3390/w8030084
7. Gu H., Jin J., Wu Y., Ek M.B., Subin Z.M. Calibration and validation of lake surface temperature simulations with the coupled WRF-lake model // *Clim. Change.* 2015. V. 129(3–4). pp. 471–483. DOI 10.1007/s10584-013-0978-y
8. Mallard M.S., Nolte C.G., Spero T.L., Bullock O.R., Alapaty K., Herwehe J.A., Gula J., Bowden J.H. Technical challenges and solutions in representing lakes when using WRF in downscaling applications // *Geosci. Model Dev.* 2015. V. 8. pp. 1085–1096. DOI 10.5194/gmd-8-1085-2015
9. Xiao C., Lofgren B.M., Wang J., Chu P.Y. Improving the lake scheme within a coupled WRF-lake model in the Laurentian great lakes // *J. Adv. Modeling Earth Sys.* 2016. V. 8 (4).
10. Wang F., Ni G., Riley W.J., Tang J., Dejun Z., Sun T. Evaluation of the WRF lake module (v1.0) and its improvements at a deep reservoir // *Geosci. Model Dev.* 2019. V. 12. pp. 2119–2138.
11. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D. M., Huang X.-Y. A Description of the Advanced Re-search WRF Version 4 // *NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR*, 2019. 145 p.
12. Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Папко В.В., Кандауров А.А., Вдовин М.И., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Натурные исследования и численное моделирование ветра и поверхностных волн на внутренних водоемах средних размеров // *Метеорол. Гидрол.* 2016. № 2. С. 85–97. DOI 10.3103/S106837391602008
13. Kuznetsova A., Baydakov G., Sergeev D., Troitskaya Yu. High resolution wave and weather forecasts using adapted WAVEWATCH III and WRF models // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. 1163. 012031.



# АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД У БЕРЕГОВ ЗАПАДНОГО КРЫМА И Г. СЕВАСТОПОЛЯ НА ОСНОВЕ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СЪЕМОК 2007-2009 гг. В ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ

*С.Г. Демьшев, Н.А. Евстигнеева*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, *naevstigneeva@yandex.ru*

Восстановление трехмерной структуры гидрофизических полей с помощью экспериментальных данных наблюдений – одна из актуальных задач современной океанологии. Реконструкция пространственно-временной структуры циркуляции Черного моря, близкой к наблюдаемой, позволяет определять области генерации мезо- и субмезомасштабных вихрей, фронтальных зон, струйных течений, зон апвеллинга, что может быть полезным при решении задач, связанных с навигацией, строительством и эксплуатацией прибрежных сооружений, добычей полезных ископаемых, прогнозировании воздействия на морскую среду аварийных выбросов загрязняющих веществ и формирования застойных зон.

Морской гидрофизический институт (МГИ) регулярно проводит экспедиционные исследования в прибрежной зоне Черного моря, в задачи которых входит получение экспериментальных данных о вертикальном и пространственном распределении гидрологических характеристик. Для анализа в данной работе были выбраны гидрологические съемки в сентябре 2007 г. и в апреле-мае 2009 г., в которых были получены данные по температуре и солёности в области Черного моря (рис. 1), включающей западное побережье Крыма и г. Севастополь.

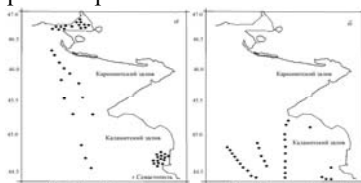


Рисунок 1. Схема станций, выполненных на: а) НИС «Эксперимент» 16 – 22 сентября 2007 г., б) НИС «Сапфир» с 29 апреля по 2 мая 2009 г.

Предлагаемый в данной работе подход основан на современной численной модели динамики [1] и процедуре фильтра Калмана, которая учитывает неизотропность и неоднородность ошибок оценок полей температуры и солёности [2]. Основная цель исследования – реконструировать с высоким разрешением трехмерные поля течений, температуры и солёности, поля энергетических характеристик, непрерывные по времени и пространству, на основе ассимиляции в гидродинамической модели данных наблюдений на НИС «Эксперимент» в осенний период 2007 г. и на НИС «Сапфир» в весенний период 2009 г. Исследование возможных физических механизмов генерации мезо- и субмезомасштабных вихрей, струйных течений у западного побережья Крыма и в районе города Севастополя на основе анализа полученных гидрофизических и энергетических полей, изучение формирования особенностей циркуляции для различных сезонов года (на примере съемок осеннего и весеннего сезонов) также представляет интерес.

Расчетная область была расположена между меридианами 28.7 и 33.8° и параллелями 44.4 и 46.8° с.ш. (учитывался уточненный рельеф дна с разрешением ~1.6 км).



Расчеты проводились на горизонтальной сетке  $\sim 1,6 \times 1,6$  км ( $302 \times 196$  точек) и на 30 вертикальных горизонтах от 1 м до 1200 м. Шаг по времени выбран 30 с. Период интегрирования уравнений модели в осенний сезон – 10 дней (с 14 по 24 сентября 2007 г.). Период интегрирования уравнений модели в весенний сезон – 6 дней (с 28 апреля по 4 мая 2009 г.). Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали были выбраны  $\nu^H = 5 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/с,  $k^H = 5 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/с. Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали рассчитывались в соответствии с аппроксимацией Филандера-Пахановского [3]. При расчетах учитывался сток рек: Дуная, Днестра, Днестра и Южного Буга. На поверхности моря каждые сутки задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, коротковолновой радиации, осадков и испарения, полученные по региональной атмосферной модели “ALADIN” [4] для осеннего сезона и по данным реанализа модели греческого центра атмосферных прогнозов “SKIRON” [5] для весеннего сезона.

В работе использовались данные гидрологических съемок на НИС «Эксперимент» в сентябре 2007 г. и на НИС «Сапфир» в апреле-мае 2009 г., взятые из банка данных МГИ. Измерения проводились на основе STD-зондов ШИК-1 и ШИК-2 (шельфовые измерительные комплексы). Максимальная глубина, до которой проводились зондирования, изменялась от 5 до 500 м. В ходе экспедиций в период 16 – 22 сентября 2007 г. было выполнено 44 станции, в период 29 апреля – 2 мая 2009 г. – 30 станций.

Подробно анализировалась область, расположенная между меридианами 32.2 и 33.8 в.д. и параллелями 44.4 и 45.4 с.ш., включающая западное побережье Крыма и г. Севастополь. По результатам расчета получено, что ветровой режим оказывал большое влияние на формирование циркуляции рассматриваемого района. Под действием юго-западного ветра в период с 14 по 18 сентября 2007 г. основное движение поверхностных течений – восточное. Под влиянием северных и северо-восточных ветров, действующих с 19 по 24 сентября 2007 г., поверхностные течения были направлены на запад. Под действием преобладающего северо-восточного ветра в период с 29 апреля по 2 мая 2009 г. основное движение течений в верхнем слое воды – западное.

И в осенний, и в весенний сезоны изменение кинетической энергии определялось, в основном, ветровым воздействием, вертикальным трением и работой силы давления; изменение потенциальной энергии – адвекцией потенциальной энергии. Чем сильнее была изменчивость притока от ветра, тем сильнее диссипация кинетической энергии.

По результатам расчета в осенний сезон были отмечены следующие особенности циркуляции: антициклонический вихрь с радиусом около 15 км в верхнем слое воды в Каламитском заливе, антициклонический вихрь с радиусом около 15 км во всем слое воды между 32.2 и 32.4° в.д., связанный с меандрированием Основного Черноморского течения. 22 и 23 сентября в верхнем 36-метровом слое усилилось течение вблизи г. Севастополь и вдоль западного берега Крыма, направленное на север и северо-запад. Вдоль побережья в течение всего расчета могли генерироваться антициклонические и циклонические вихри малых масштабов в верхнем слое.

По результатам расчета в весенний сезон были получены следующие особенности циркуляции: антициклонический вихрь с радиусом около 15 км в верхнем слое воды в Каламитском заливе, в слое 10–36 м вихревые образования с радиусом менее 10 км вблизи г. Евпатория и г. Севастополь.

Отмечено, что возможным механизмом формирования антициклонического вихря в Каламитском заливе и в осенний, и в весенний сезоны могла быть сдвиговая неустойчивость течения. Анализировались пространственные распределения слагаемого  $\tau \rightarrow E = u_0 \tau^x + v_0 \tau^y$ , определяющего вклад в кинетическую энергию от ветра, которое получено путем интегрирования по вертикали уравнения бюджета

кинетической энергии. На рис. 2, а и в представлены поля течений на горизонте 5 м в осенний сезон 2007 г. и в весенний сезон 2009 г. Также на рис. 2, б и г представлены соответствующие им поля  $\tau \rightarrow E$ .

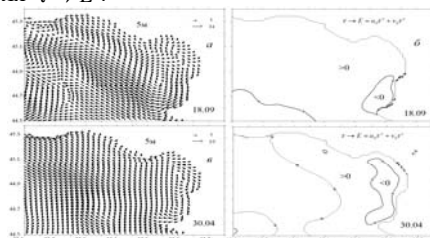


Рисунок 2. Поле: а) течений (см/с) на горизонте 5 м 18 сентября 2007 г., б)  $\tau \rightarrow E = u_0 \tau^x + v_0 \tau^y$  (эрг/(с·см<sup>2</sup>)) 18 сентября, в) течений (см/с) на горизонте 5 м 30 апреля 2009 г., г)  $\tau \rightarrow E$  (эрг/(с·см<sup>2</sup>)) 30 апреля.

Приток энергии от ветра преобладал практически во всей области, кроме Каламитского залива. В зоне, где работа силы ветра была отрицательна, в поле скорости имел место горизонтальный сдвиг: на шельфе течение было направлено на северо-восток, а в глубоководной части моря – на юго-запад.

Возможный механизм формирования вихрей малых масштабов (с радиусом менее 10 км) и в осенний, и в весенний сезоны – обтекание течения неоднородностей рельефа дна и береговой орографии. Так как в весенний период ветровое воздействие было более интенсивное, чем в осенний период, мезомасштабные вихревые образования были выражены слабее и вдоль побережья в верхнем слое субмезомасштабные вихри не формировались.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополь в рамках научного проекта № 18-45-920019.*

#### Литература / References:

1. Демьшев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. ФАО. 2012. Т. 48 (1). С. 137–149.
2. Кныш В.В., Моисеенко В.А., Саркисян А.С., Тимченко И.Е. Комплексное использование измерений на гидрофизических полигонах океана в четырехмерном анализе // Докл. АН СССР. 1980. Т. 252. №4. С. 832–836.
3. Pacanowski R.C., Philander S.G.H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Oceanogr. 1981. V. 11 (11). pp. 1443–1451.
4. The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research / members of the ALADIN international team // World Meteorol. Org. Bull. 1997. V. 46 (4). pp. 317–324.
5. NonHydrostatic SKIRON / Eta Modelling System. <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php>



#### ИСТОЧНИКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

И.А. Дорощенко<sup>1</sup>, И.А. Знаменская<sup>1</sup>, Д.А. Коротеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, [znamen@phys.msu.ru](mailto:znamen@phys.msu.ru)

<sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий, Москва, [d.koroteev@skoltech.ru](mailto:d.koroteev@skoltech.ru)

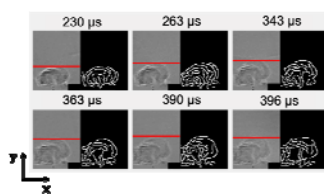
В последние годы развитие цифровых технологий качественно увеличило объем визуальной информации, получаемой при анализе физических полей в геосредах и при

моделировании соответствующих процессов в лабораторных условиях на основе оптических панорамных методов: потоков в жидких, газовых, плазменных геосредах[1].

Источником информации в лабораторном моделировании являются большие массивы анимационных данных о динамических процессах, получаемые с помощью цифровых высокоскоростных камер. Исследования проводятся с помощью аппаратуры высокого пространственного и временного разрешения в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения.

Источником данных в геофизике становятся данные со спутников о быстрых динамических процессах в атмосфере и медленных квазистатических процессах на поверхности и в недрах Земли. Особое значение имеют данные термографии о распространении зон потенциального повторного возгорания в зонах лесных пожаров. Накапливаются массивы больших данных визуализации, недоступные для привычных методов обработки и анализа. Необходимо использование машинного обучения и соответствующих нейронных сетей.

Так, полностью связанная нейронная сеть может предсказывать увлажнение и нагрев на основе анализа массивов данных геофизической информации из крупных областей околоземного пространства при обучении по большим данным за 3–12 месяцев. Конечная цель таких улучшений – параметризации подсетей в моделировании климата.



*Рисунок 1. Последовательный набор теневых фотографий и обработанных методом выделения границ изображений развития конвективного течения (горизонтальная линия указывает автоматически определенное положение верхней границы потока).*

На физическом факультете МГУ проводится работа по адаптации и созданию программ распознавания структурных элементов в газах, жидкостях и плазме. Разработанное программное обеспечение (ПО) позволяет классифицировать теневые изображения различных течений, выделяя на них вихри, ударные волны, конвективные потоки, струи и другие структуры и отслеживая их положение или геометрические размеры с помощью свёрточных нейронных сетей (англ. convolutional neural network, CNN). Также разработано ПО для отслеживания динамики движения течений с помощью алгоритмов цифровой обработки изображений, в том числе, с помощью алгоритма распознавания границ Кэнни (англ. Canny edge detection) [2]. Программы позволили, в частности, исследовать большие массивы данных теневой съемки возмущений, распространяющихся от импульсного поверхностного разряда, инициируемого в пограничном слое (рис. 1).

В геофизике подобные задачи с успехом решаются в области нефтегазодобычи. Геофизическая информация нефтегазовой отрасли весьма разнообразна по своей структуре. Она включает временные ряды (сейсмические трассы, реальновременные данные, получаемые при бурении скважин), векторы (данные внутрискважинных исследований, 3D и 2D объекты (сейсмические кубы и сечения ядра различного разрешения), слабоструктурированные таблицы (данные рутинного и специального анализа ядра). Алгоритмы машинного и глубокого обучения уже зарекомендовали себя мощным инструментом для автоинтерпретации данных геофизических

исследований скважин [3].

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 19-08-00661*

### **Литература / References:**

1. Знаменская И.А. Вихревые процессы в геосредах. Принципы экспериментального моделирования, визуализации, цифрового анализа // Сб. матер. шк. «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», 2018. Карев В.И., Показеев К.В. (ред.). М.: ИПМех РАН, 2018. С. 149–150.
2. Canny J., A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vols // PAMI-8. 1986. No. 6. pp. 679–698.
3. Meshalkin Y., Koroteev D., Popov E., Chekhonin E., Popov Y. Robotized petrophysics: Machine learning and thermal profiling for automated mapping of lithotypes in unconventional // J. Petrol. Sci. Eng. 2018. V. 167. pp. 944–948.



## **ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТЕЙ И ПОГЛОЩЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ УГОЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ**

*Г.А. Дугаров<sup>1</sup>, М.И. Фокин<sup>1</sup>, А.А. Дучков<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, dugarovga@ipgg.sbras*

*<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

Наибольший интерес в ресурсном аспекте представляют природные гидраты в высокопроницаемых песчаных породах. Именно по этой причине гидратонасыщенные песчаники исследуются наиболее интенсивно. При этом другие классы гидратосодержащих пород изучены менее значительно. Макогон еще в 1974 г. выдвинул гипотезу о возможном наличии газогидратов в природном угле [1], но лишь относительно недавно были проведены лабораторные исследования, подтверждающие возможность образования гидратов из связанной природными углями воды [2–4]. В данной работе рассматриваются результаты серии экспериментов по изучению акустических свойств подобных угольных образцов, содержащих гидрат метана.

Для формирования гидратосодержащих образцов используется специализированная установка, позволяющая создавать подходящие для образования гидрата термобарические условия в образцах, содержащих воду и свободный газ-гидратообразователь, в данном случае метан, а также проводить акустические измерения [5–6]. Чтобы получить образец с равномерным распределением гидрата в нем, уголь был предварительно измельчен и просеян. Учитывая сложную пористую структуру угля, он затем был высушен при 110°C под вакуумом и выдерживался несколько недель в эксикаторе с водой. Таким образом был получен уголь, содержащий только адсорбированную воду (воздушно насыщенный), с известным содержанием воды. Далее, на этапе помещения угля в ячейку, в некоторые образцы дополнительно добавлялась дистиллированная вода («свободная»).

В ходе изучения акустических свойств сформированных образцов была выявлена температурная зависимость скоростей продольных волн, см. рис. 1. При повышении температуры значение скорости снижается, пока температура не превысит область стабильности гидрата метана (порядка 17°C при давлении метана в 150 атм). При превышении этого значения происходит разложение газогидрата, что выражается в резком падении скоростей.

Аналогичная зависимость наблюдается и для поглощения продольных волн для тех же образцов, см. рис. 2. Только в этом случае при повышении температуры

наблюдается повышение значения поглощения (величины обратной добротности). При выходе из области стабильности гидрата метана наблюдается резкое увеличение величины поглощения. Также на рис. 2 видно, что для образца с меньшим гидратонасыщением (C07) поглощение определяется менее стабильно ввиду слабой сцементированности образца.

Обнаруженные температурные зависимости скоростей и поглощения продольных волн для значений в области стабильности гидрата приводят к необходимости дальнейшего изучения акустических свойств угольных гидратосодержащих образцов и проведения большего числа экспериментов для наработки статистики. При этом некоторые из них необходимо проводить совместно с проведением химических анализов, а также анализом пористой структуры угля, для получения возможности интерпретации полученных зависимостей.

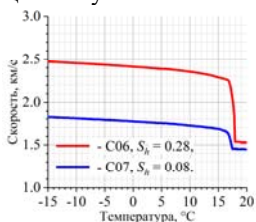


Рисунок 1. Температурные зависимости скоростей продольных волн в угольных образцах,  $S_h$  – гидратонасыщение образцов (доля объема порового пространства, занятого гидратом).

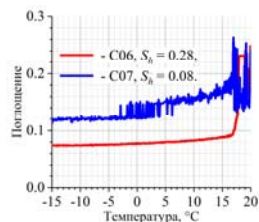


Рисунок 2. Температурные зависимости поглощения продольных волн в угольных образцах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-77-00068, а также гранта Президента МК-2647.2019.5.

### Литература / References:

1. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974. 208 с.
2. Bustin A.M.M., Bustin R.M., Moudrakovskim I.L., Takeya S., Ripmeester J.A. Formation of methane clathrate hydrates in coal moisture: Implications for coalbed methane re-sources and reservoir pressures // Energy and Fuels. 2016. V. 30. pp. 88–97.
3. Smirnov V.G., Manakov A.Y., Ukraintseva E.A., Villevald G.V., Karpova T.D., Dyrdin V.V., Lyrshchikov S.Y., Ismagilov Z.R., Terekhova I.S., Ogienko A.G. Formation and decomposition of methane hydrate in coal // Fuel. 2016. V. 166. pp. 188–195.
4. Smirnov V.G., Manakov A.Y., Dyrdin V.V., Ismagilov Z.R., Mikhailova E.S., Rodionova T.V., Villevald G.V., Malysheva V.Y. The formation of carbon dioxide hydrate from water sorbed by coals // Fuel. 2018. V. 228. pp. 123–131.
5. Дучков А.Д., Голиков Н.А., Дучков А.А., Манаков А.Ю., Пермяков М.Е., Дробчик А.Н. Аппаратура для изучения акустических свойств гидратосодержащих пород в лабораторных условиях // Сейсмич. приборы. 2015. Т. 51(2). С. 44–55.
6. Дучков А.Д., Дучков А.А., Пермяков М.Е., Манаков А.Ю., Дробчик А.Н., Голиков Н.А. Лабораторные измерения акустических свойств гидратосодержащих песчаных образцов (аппаратура, методика и результаты) // Геол. Геофиз. 2017. Т. 58(6). С. 900–914.



# ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ И РЕЛЬЕФА ДНА НА ВДОЛЬБЕРЕГОВОЕ ДАУНВЕЛЛИНГОВОЕ ТЕЧЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

Д.Н. Елкин, А.Г. Зацепин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, [dmelkin@mail.ru](mailto:dmelkin@mail.ru)

Вдольбереговое прибрежное течение, достигающее дна моря, формирует придонный экмановский слой (ПЭС), в котором перенос воды происходит перпендикулярно направлению течения и влево от него (в северном полушарии). В случае - даунвеллингового вдольберегового течения, в ПЭС происходит перенос воды от берега и ее опускание по склону дна [1]. При наличии устойчивой стратификации, достигая определенной глубины, менее плотная вода в ПЭС останавливается и конвективным образом перемешивается с вышележащими водами. Ранее процесс опускания вод в ПЭС исследовался на гладком дне [2]. Морское дно нередко имеет сложный рельеф, с наличием хребтов и каньонов, гор и впадин, и часто бывает шероховатым [3].

Цель работы – лабораторное исследование динамики даунвеллингового прибрежного течения и связанного с ним ПЭС на наклонном дне при наличии и в отсутствии плотностной стратификации, а также при наличии особенностей рельефа или шероховатости дна.

Эксперименты проводились в цилиндрическом бассейне, заполненном пресной или соленой водой, и расположенном на вращающейся против часовой стрелки платформе. В центре бассейна установлен усеченный конус с нижним основанием, закрепленном на дне бассейна. Поверхность конуса играет роль наклонного дна. В опытах с хребтом на дне, на поверхность конуса вдоль образующей прикрепляется тонкая вертикальная пластинка треугольной формы, острый угол которой расположен у верхнего основания конуса. Для исследования влияния шероховатости: боковая поверхность конуса покрывается ковриком, вышитым бисером - мелкими шариками. В центре верхнего основания усеченного конуса сделано отверстие, соединенное шлангом с сосудом Мариотта. Над верхним основанием расположен пустотелый цилиндр с щелью – кольцевой источник, через который из сосуда Мариотта подается подкрашенная красителем вода в бассейн.

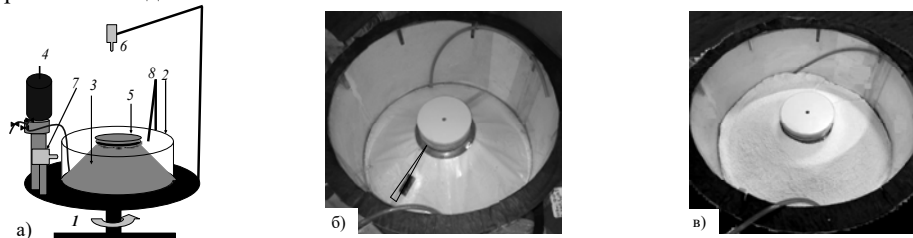


Рисунок 1. Лабораторная установка: а) схема, вращающаяся платформа (1), бассейн, (2), усеченный конус (3), сосуд Мариотта (4), щелевой источник (5), видеокамера сверху (6), боковая видеокамера (7), датчик, измеряющий электропроводность воды (8); б) фото для случая с хребта на дне; в) фото для случая с шероховатым дном.

Поступающая в бассейн вода образует вокруг источника вдольбереговое антициклоническое течение. Из-за трения о дно возникает ПЭС, в котором происходит опускание воды. Вид прибрежного течения и ПЭС снимался сверху и сбоку

видеокамерами. В некоторых опытах производились зондирования водной среды микродатчиком электропроводности для определения вертикального распределения солености. Для определения скорости течения на поверхность воды помещались бумажные пелетки. Опыты проводились при различных значениях скорости вращения платформы, расхода источника, размера шероховатости дна, солености воды в бассейне (при этом из щелевого источника поступает пресная вода). Опыты проводились с хребтом и без хребта (рис. 1).

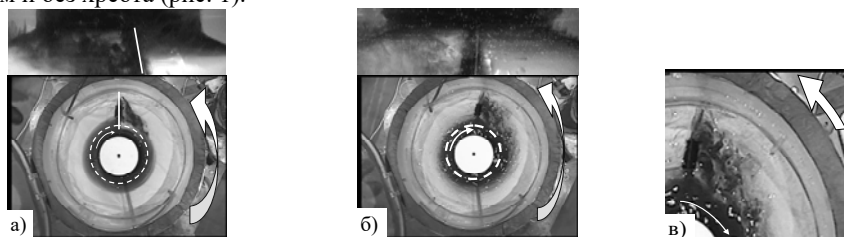


Рисунок 2. Вид фронтального течения над поверхностью конуса, образованного постоянно действующим источником ( $Q = 8 \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $f = 1,25 \text{ с}^{-1}$ ) в случае с хребтом: а) в баротропном случае ( $\rho_1 \approx \rho_0$ ): вид сбоку сверху; вид сверху внизу; б) в бароклинном случае ( $\rho_1 < \rho_0$ ): вид сбоку сверху; вид сверху внизу; в) трехмерные конвективные структуры в бароклинном случае ( $\rho_1 < \rho_0$ ). Пунктир – внешняя фронтальная граница прибрежного течения вне области хребта. Толстая стрелка – направление вращения платформы, тонкая – направление прибрежного течения.

В баротропном случае в бассейн залита пресная вода ( $\rho_1 \approx \rho_0$ ), а подкрашенная пресная вода, поступающая из источника на поверхность конуса, первоначально образует антициклоническое осесимметричное баротропное прибрежное течение, расширявшееся радиально. Однако в определенный момент времени ширина слоя подкрашенной воды и связанного с ним прибрежного течения перестает расти. Стабилизация положения фронта подкрашенной воды обусловлена формированием в ПЭС потока с расходом  $Q_e \approx Q$ , где  $Q$  – расход щелевого источника, распространяющегося вниз по склону и выходящего со временем далеко за пределы фронтальной зоны баротропного слоя подкрашенной воды. При этом прибрежное течение также достигает стационарного состояния и его стрелень (максимум азимутальной скорости) находится на внешней границе баротропного слоя подкрашенной воды. При наличии хребта, когда подкрашенная вода фронтального течения натекает на хребет. При этом она замедляется, и перед хребтом уровень воды повышается по сравнению с удаленными от хребта районами. Поэтому поле давления перед хребтом опускает воду прибрежного течения и связанного с ним ПЭС вниз, а за хребтом – поднимает ее вверх по склону. Вода в зоне хребта опускается значительно глубже, чем вне зоны хребта (Рис. 2а). При наличии хребта: вне зоны хребта: скорость опускания воды в ПЭС меньше, скорость течения на поверхности меньше, ширина течения больше, а толщина ПЭС – больше, чем в отсутствии хребта. В случае шероховатого дна, с ростом размера шероховатости скорость опускания воды в ПЭС убывает, скорость течения на поверхности убывает, ширина течения убывает, а толщина ПЭС – возрастает.

В бароклинном случае при небольших значениях солености воды в бассейне ( $\rho_1 < \rho_0$ ), наклонный фронт течения достигает поверхности конуса и происходит

формирование ПЭС с опусканием менее плотной воды вниз по склону. Со временем, ПЭС испытывает конвективную неустойчивость. В нем формируются валиковые структуры, вытянутые в азимутальном направлении. Затем они распадаются на трехмерные вихревые структуры, в которых подкрашенная вода ПЭС медленно поднимается вверх, вплоть до свободной поверхности воды.

На рис. 2, б показана структура течения при небольшом отличии плотности воды в источнике от воды в бассейне в случае с хребтом. Видно невязкое ядро прибрежного течения как темное кольцо подкрашенной пресной воды вокруг источника, а на периферии видны вихревые элементы конвекции, порожденной конвективной неустойчивостью ПЭС. Возле хребта также видны вихревые элементы конвекции на большем расстоянии от темного кольца, где элементы конвекции – это небольшие вихревые течения подкрашенной воды.

На рис. 2, в показан сегмент бассейна с фронтальным течением и вихревыми элементами конвекции возле хребта. При наличии хребта в окрестности хребта наблюдалось утолщение ПЭС, это приводило к более раннему развитию конвекции. Шероховатость дна значительно интенсифицировала процесс конвекции по сравнению с гладким дном. Интенсификация конвекции происходила, главным образом, за счет увеличения толщины ПЭС, которое, в свою очередь приводило к росту числа Релея - критерия развития конвекции. Поскольку толщина слоя входит в число Релея в кубической степени, ее увеличение на 25% вызывает почти двукратное увеличение значения этого числа.

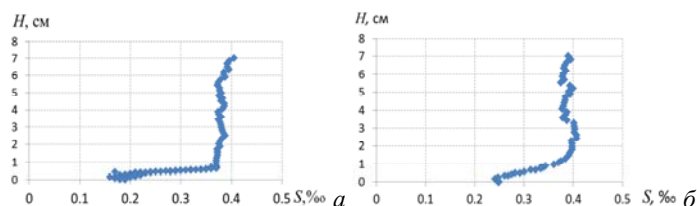


Рисунок 3. Профиль солёности, измеренной датчиком электропроводности от поверхности дна до высоты  $H$  водного слоя ( $Q = 8 \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $f = 1,25 \text{ с}^{-1}$ ,  $S=0,4 \text{ ‰}$ ), а) гладкое дно; б) шероховатое дно, где размер шероховатости:  $d = 1,9 \text{ мм}$ .

В некоторых опытах производились зондирования водной среды микродатчиком электропроводности. Датчик равномерно опускался вниз, а затем поднимался вверх и регистрировал вертикальное распределение солёности. В придонном слое, толщиной около 1 см, солёность уменьшается квазилинейно по направлению ко дну (рис. 3). Значения толщин ПЭС хорошо согласуются с ранее выполненными расчетами его толщины [2].

При большом различии плотности воды в бассейне и источнике (при большой солёности воды в бассейне), наклонный фронт течения не достигает поверхности конуса, и опускание более легкой жидкости в ПЭС, как на гладком, так и на шероховатом дне не происходит. Из-за этого при работающем источнике масса жидкости, заключенная внутри области прибрежного течения, растет непрерывно, и положение его фронта не стабилизируется, а происходит его радиальное распространение вплоть до боковых стенок бассейна.

*Работа выполнена в рамках государственной темы 0149-2020-0004 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00496.*



## Литература / References:

1. Журбас В.М., Ох И.С., Парк Т. Роль бета-эффекта в угасании вдольбереговой бароклинной струи, связанной с переходящим прибрежным ап- и даунвеллингом: численные эксперименты // *Океанол.* 2006. Т. 46. № 2. С. 189–196.
2. Елкин Д.Н., Зацепин А.Г., Подымов, О.И., Островский А.Г. Опускание вод в экмановском слое, образованном прибрежным даунвеллинговым течением над наклонным дном // *Океанол.* 2017. Т. 57. № 4. С. 531–537.
3. Елкин Д.Н., Зацепин А.Г., Салаватова Л.И. Лабораторное исследование влияния шероховатости и рельефа дна на вдольбереговое даунвеллинговое течение и связанный с ним придонный экмановский слой // *Процессы в геосредах.* 2019. № 4 (22). С. 471–479.



## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЬДА НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

*В.П. Епифанов*

*Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, evp@ipmnet.ru*

Лёд как горная порода обладает рядом специфических свойств, которые влияют на его прочностные и механические характеристики. Эта зависимость проявляется в большей мере, чем у других твёрдых тел. Поскольку механика льда представляет интерес не только с научной точки зрения, но и при решении практических задач освоения Арктики и Антарктики, то вопросы достоверного определения его механических и прочностных свойств сохраняют свою актуальность до настоящего времени. Особенности льда как материала проявляются в строении его кристаллической решётки. Это — высокая гомологическая температура льда и анизотропия. В начале пластического деформирования сдвиги происходят в основном по базисной плоскости. Однако на последующих стадиях смещения дислокаций происходят практически по всем плоскостям кристаллической решётки, причём эта смена проявляется в относительно небольшом интервале температур, скоростей деформации и напряжений.

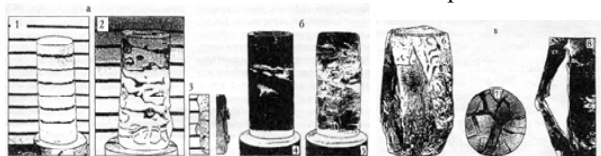
В основном реализуются три механизма деформаций: скольжение по плоскостям кристаллической решётки, межкристаллитное скольжение и рекристаллизация. Накопление дефектов и их влияние на результаты измерений становится настолько большим, что возникает вопрос о единообразии методических процедур.

При прочих равных условиях воспроизведение результатов измерений обеспечивается проверкой на идентичность образцов, подготовленных к механическим испытаниям. Проверка выполняется с помощью акустических методов, как наиболее чувствительных к структурным особенностям любого материала. Измеряются импульсно-фазовым методом коэффициент поглощения и скорость распространения ультразвуковых волн. Импульсно-фазовый метод является прецизионным методом и позволяет выявить малейшие дефекты структуры и исследовать далее идентичные по структуре образцы, что является фундаментом для дальнейших измерений механических и прочностных характеристик льда. Понятно, что такая методика идентификации пригодна для подготовки образцов других материалов.

Отметим, что в случае приготовления льда замораживанием дистиллированной воды, аналогичные требования соблюдаются и к чистоте используемой воды. Особое внимание обращается на условия замораживания (перемешивание, градиент температуры, объём и так далее). Примером, подтверждающим влияние условий замораживания воды на структуру льда, является классификация льда, предложенная Н. В. Черепановым [1].

Поиски единообразия условий испытания и соотнесения полученных результатов измерений со свойствами льда в ледяном поле приводят к необходимости разработки подхода, который позволял бы наметить возможность оценки прочностных свойства льда в условиях залегания. Наиболее перспективным направлением является учёт основных закономерностей и термодинамического состояния льда при деформировании и разрушении [2]. Такой подход в механике прочности и разрушения льда учитывает деформационные изменения структуры и текстуры льда непосредственно в процессе механического нагружения наряду с традиционно измеряемыми температурой и скоростью деформации. В качестве примера рассматриваются статический и динамический режим деформирования льда.

Вид исследуемых образцов льда в исходном, промежуточном и конечном состояниях при испытаниях на осевое сжатие показан на рис. 1.



*Рисунок 1. Деформационные мезоструктуры: 1 – исходный образец, 2 – образец с остаточной деформацией около 6%, 3 – пластические брекчи трения, 4 – первые трещины, 5 – образец, подвергнутый максимальным напряжениям сжатия, 6 – дилатантное разрушение (вид сбоку), 7 – то же снизу, 8 – пластический шарпир.*

Во всех случаях нарушение сплошности, начинается внутри образца, причём пластическая деформация локализована. Фрагменты деформационных элементов структуры имеют округлую форму (рис.1,3). Из всего многообразия наблюдаемых эффектов для рассмотрения выделим фрагмент рисунка 1,4, в котором плоскость первой трещины расположена ортогонально оси образца. Анализ показал, что такая ориентация трещин обусловлена волновым механизмом их формирования.

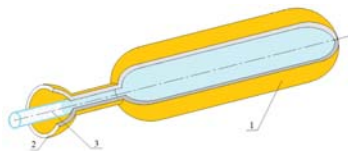
Отметим, что образцы при испытаниях на сжатие помещаются между плоскопараллельными грузовыми площадками, поэтому когерентное излучение упругих волн при деформировании льда приводит к формированию стоячих волн между этими площадками. Высокое гидростатическое сжатие и наложение фронтов стоячих волн вблизи отражающей поверхности оказалось достаточным для образования микроскопических разрушений во льду.

Рассмотрим влияние волновых процессов на динамику и кинетику разрушения льда на стадии пластического деформирования льда. На рис. 2 показана схема разборной камеры высокого давления, профиль которой аналогичен соплу Лавалья. При такой схеме нагружения лёд находится в условиях бокового стеснения, что в большей степени соответствует движению большой массы льда.

В переходной части, между корпусом камеры (1) и патрубком (2), размещается мембрана (на рисунке не показана) в виде диска из отождённой меди, выполняющая роль клапана. При замораживании воды внутри камеры создаётся давление, которого определяется разностью плотностей воды и льда. Мембрана рассчитана на заданное давление  $P_{крит}$ , при достижении которого происходит её срезание. В этот момент мембрана получает начальную скорость и происходит «выстрел». Результат взаимодействия мембраны с мишенью показан на рис. 3.

При «выстреле» во льду возникает волна растяжения. Интерференция первичной и отражённой волн от стенок камеры в условиях гидростатического сжатия создают условия для интенсивной пластической рекристаллизации льда. Процесс

рекристаллизации контролируется с помощью импульсно-фазового метода (прозвучивание ортогонально оси камеры ультразвуковыми импульсами (рис. 4) и метода акустической эмиссии. В случае прозвучивания находится окно, относящееся к сигналу, который проходит через лёд, и оцениваются его акустические параметры (характеризующие деформационные изменения структуры льда) [3]. Методика исследования сигналов акустической эмиссии изложена в [4].



*Рисунок 2. Схема твердотельного аккумулятора давления, имеющего профиль сопла Лаволя: 1 – толстостенный корпус камеры, 2 – патрубком, 3 – струя льда.*



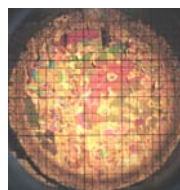
*Рисунок 3. Результат выстрела ледовой пушки: в центре мембрана, вокруг след взаимодействия переохлажденной воды с деревянной мишенью.*

Поскольку камера разборная, то при необходимости для каждого момента нагружения процесс может быть приостановлен и по микроскопическим исследованиям шлифов независимо определена вторичная структура и текстура льда (рис. 5).

Под микроскопом отчетливо видны различия вторичных текстур льда, сформировавшихся у стенок камеры (мелкокристаллический лёд) и в средней части (кристаллические агрегаты, разделённые прослойкам стеклоподобным аморфным льдом).



*Рисунок 4. Осциллограмма ультразвукового импульса: амплитуда 100 мВ, масштаб времени 1 мкс/клетка.*



*Рисунок 5. Поперечный шлиф льда в цилиндрической секции камеры: у стенок камеры мелкокристаллическая.*

Таким образом, проиллюстрировано необычное свойство льда уменьшаться в объёме при плавлении, а при уменьшении давления повышать температуру своего плавления. Актуальность этого исследования состоит в физическом моделировании процесса «переохлаждения» воды за счёт резкого сброса гидростатического давления. Эффект зависит от методики разгерметизации сосуда. Сопоставляя наблюдаемую картину вторичных текстур льда и фазовую диаграмму давление—температура, можно заключить, что при «выстреле» находящаяся в камере незамёрзшая часть воды оказывается сильно (на 44°) переохлаждённой. По желанию, подбирается режим, при котором либо макроскопический объём воды сохраняется в твёрдом аморфном состоянии, либо формируется близкая к однородной вторичная структура льда [5].

Обычно переохлаждение воды на 4-5 градусов достигается просто. Более значительные переохлаждения требуют разнообразных процедур. Так, для переохлаждения воды до  $-15^{\circ}\dots-12^{\circ}$  градусов воду кипятят, создают разрежение, запаивают в трубках и капиллярах, помещают воду в другую жидкость с такой же плотностью как вода. В природе переохлаждённая почти до  $-80^{\circ}$  С вода находится в

виде капелек в облаках. В лабораторных условиях изменения структуры и текстуры льда удаётся получить быстрее, чем в природе [6]. В работах Тамманна (*Tammann G., 1910*) и Бриджмена (*Bridgman P.W., 1935*) были реализованы давления соответственно до 4000 атм и 20 000 атм. В то время как давления в нижних слоях ледникового покрова в полярных странах редко превышает 1-2 тысячи атмосфер. При таком давлении существуют, кроме льда Ih и Ic, несколько аллотропических форм льда (лёд II... лёд VI). Используемое в данной работе оборудование позволяло получать в штатном режиме гидростатические давления в камере до 150 МПа, измерять акустические характеристики льда в рабочем интервале частот от 10 Гц до 20 МГц и температурном интервале от -0.2° до - 44° С.

В настоящей работе глубокое искусственное переохлаждение большой массы воды использовалось для получения образцов льда мелкокристаллической структуры. Уникальные свойства такого льда, «проведённого» через сопло Лаваля, проявляются в высокой пластичности, низкой динамической вязкости (20 МПа·с) и высоким коэффициентом трения (при движении в цилиндрическом канале патрубка) [5]. Полученные результаты могут быть использованы, например, для физического моделирования природных процессов (движение полярных ледников по ложу), а также для физического моделирования контактного разрушения льда при его взаимодействии с сооружениями.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-01-00649.*

#### **Литература / References:**

1. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоемов // Науч. тр. Ин-та Арктики и Антарктики. 1976. Т. 331. С. 77–99.
2. Епифанов В.П. Физическое моделирование режимов движения ледников // Лед и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 333–344.
3. Епифанов В.П. Разрушение поликристаллического льда // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. № 6. С. 1364–1367.
4. Епифанов В.П. Влияние промежуточного слоя на прочность соединения льда с подложкой // Доклады РАН. Техническая физика. 2017. Т. 472. № 1. С. 27–32.
5. Епифанов В.П. Влияние импульсов напряжений на структуру льда в промежуточном слое // Доклады РАН. Техническая физика. 2018. Т. 479. № 6. С. 629–633.
6. Епифанов В.П., Сазонов К.Е. Влияние стоячих волн на локальную прочность моделированного ледяного поля // Доклады РАН. Техническая физика. 2018. Т. 479. № 6. С. 30–35.



---

## **ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ МЕЛКОВОДНОГО ВОДОЕМА**

*А.Ю. Жидкова*

*Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), Таганрог,  
Ростовская область, soleils@bk.ru*

Результаты геоэкологических исследований однозначно свидетельствуют о том, что загрязнение морских вод является одной из важнейших задач экологического мониторинга. Чрезмерное эвтрофирование акватории приводит к серьезным нарушениям в функционировании аквальной экосистемы, вызывает заболачивание территории, гибель рыб, что, в свою очередь, оказывает влияние и на человека [1].

Степень эвтрофирования водоема зависит от величины его внешней и внутренней

биогенных нагрузок (фосфора и азота) и может быть замедлена путем их снижения. Пути снижения внешней биогеоценной нагрузки на Таганрогский залив Азовского моря обсуждались нами ранее [2–4]. В данной работе мы разработали комплексную информационно-измерительную систему для геоэкологической оценки степени эвтрофирования слабосоленого мелководного водоема на примере Таганрогского залива Азовского моря.

Разработанная информационно-измерительная система оценки степени эвтрофирования водоема является составной частью системы экологического мониторинга, в которую входят следующие основные процедуры [5]:

- выделение объекта мониторинга и его основных параметров;
- исследование выделенной акватории, включающее в себя: планирование и проведение измерений;
- составление базы данных об исследуемой акватории;
- составление и верификация информационной и математической модели для объекта наблюдения;
- оценка состояния акватории с позиции эвтрофирования;
- прогнозирование изменения состояния водоема;
- систематизация полученной информации.

**Материалы и методы.** Сама информационно-измерительная система экологического мониторинга не включает деятельность по управлению качеством окружающей природной среды. Тем не менее, она является источником информации столь необходимой для правильной оценки экологического состояния исследуемого объекта и принятия экологически значимых решений.

Перспективные информационно-измерительные и автоматизированные системы экологического мониторинга создаются как интегрирующая надстройка уже существующих систем наблюдения [6]. Для комплексной геоэкологической оценки степени эвтрофирования водоема в нашей работе применяются следующие функциональные составляющие:

1. Датчики для определения водородного показателя, солености воды концентраций растворенного в воде кислорода, нитратов, нитритов, фосфатов, аммоний иона, а также температуры водных масс;
2. Система GPS для определения координат мест отбора проб воды;
3. Центр моделирования;
4. Центр сравнения, анализа и прогнозирования;
5. Центр картографического отображения данных;
6. Центр систематизации данных.

Информационно-измерительная система оценки степени эвтрофирования водоема работает следующим образом.

1. Выбирается объект для комплексной геоэкологической оценки степени эвтрофирования водоема.
2. Выделяется район исследования (географическая зона с определенными координатами).
3. Определяются и указываются на карте координаты пунктов отбора проб и время (например, для Таганрогского залива Азовского моря измерения проводились в вегетационный период (с начала апреля по конец октября) в 20 местах отбора проб).
4. Составляется краткая характеристика акватории, включающая в себя обзор и анализ литературных данных по гидродинамике водного объекта, температурному режиму, солености, pH, содержанию растворенного кислорода и биогеоценных веществ (аммоний иона, нитратов, нитритов и фосфатов).

5. Отбор проб воды и определение датчиками водородного показателя, солености воды концентраций растворенного в воде кислорода, нитратов, нитритов, фосфатов, аммоний иона, а также температуры водных масс согласно плану. Для анализа использовались различные датчики и приборы, типа: «Экотест-2000» и спектрофотометр КФК-3.

6. Собранные данные отправляются в центр моделирования, где с помощью специального программно-технического комплекса, например, «Statistika», строится математическая информационная модель определения показателя трофности водного объекта и проводится ее верификация.

7. Полученные данные моделирования поступают в центр сравнения, анализа и прогнозирования, где происходит:

- анализ собранной базы данных по температурному режиму, солености, рН, содержанию растворенного кислорода и биогенных веществ (аммоний иона, нитратов, нитритов и фосфатов);

- расчет показателя трофности вод;

- оценка величины внешней и внутренней биогенных нагрузок (фосфора и азота) водной экосистемы;

- анализ и оценка экологически допустимых концентраций биогенных веществ и их экологических резервов;

- прогнозирование экологического состояния водного объекта с позиции эвтрофирования при различных условиях.

8. Далее данные их центра сравнения, анализа и прогнозирования поступают в центр картографического отображения данных, где на основе программной среды ArcGIS происходит построение различных картосхем для наглядного отображения полученных результатов исследования.

9. На завершающем этапе все данные систематизируются и представляются в удобной для изучения форме.

**Результаты.** В работе использованы результаты анализов проб морских и сточных вод для акватории Таганрогского залива Азовского моря по определению температуры воды, солености, содержанию растворенного кислорода, рН, нитратов, аммоний иона, нитритов и фосфатов, полученные в вегетационный период. Для анализа были использованы различные датчики и приборы, типа: «Экотест-2000» с отдельными они-селективными электродами для определения каждого показателя и спектрофотометр КФК-3. Таким образом, уникальность собранной базы данных обуславливается:

- едиными методами отбора и анализа проб;

- широким охватом точек наблюдений на водным объекте;

- оптимизированными внутри- и межгодовыми сроками отбора проб, необходимыми для оценки временной изменчивости состояния водных экосистем;

- широким набором перечня показателей, определяемых при анализе поверхностных вод.

Подсистема сравнения, анализа и прогнозирования представляет собой программный модуль, который устанавливается на рабочее место оператора и после ввода полученных первичных данных отображает информацию об экологическом состоянии водоема с позиции эвтрофирования. Подсистема строится на базе персонального компьютера с использованием современного программного обеспечения.

**Выводы.** Так, для Таганрогского залива Азовского моря можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее значимыми факторами, влияющими на эвтрофирование вод

Таганрогского залива Азовского моря на современном этапе являются: температура вод, их соленость, а также концентрации нитратов, аммоний иона и фосфатов.

2. Построенная на основе разработанной информационно-измерительной системы оценки степени эвтрофирования водоема модель изменения показателя трофности вод для Таганрогского залива Азовского моря показала, что в настоящее время воды данной акватории находятся преимущественно в мезотрофном состоянии, переходящим в эвтрофное.

3. Наибольший вклад в общую внешнюю биогенную нагрузку вод Таганрогского залива вносит речной сток.

4. Экологический резерв вод Таганрогского залива в настоящее время истощен для таких биогенных веществ как: нитраты, аммоний ион и фосфаты.

Полученные результаты по оценке степени эвтрофирования водоема на примере Таганрогского залива Азовского моря позволили наглядно отобразить функции и преимущества данной информационно-измерительной системы:

1. Информация об эвтрофном состоянии водоема может поступать в режиме реального времени, что делает возможным при необходимости проводить оперативный анализ геоэкологической обстановки акватории с позиции эвтрофирования.

2. При систематизации данные представляются в удобной для изучения форме: математических моделях, графиках, таблицах, диаграммах, картосхемах, уравнениях.

3. Все полученные данные накапливаются и архивируются. Таким образом, создается регулярно пополняемая база данных, которая включает в себя возможности информационного поиска.

4. Проводится математическое моделирование для различных экологических процессов, которые позволяют наиболее полно оценить качество вод акватории с позиции эвтрофирования.

5. Проводятся детальный анализ и оценка водного объекта с позиции эвтрофирования, выполняются задачи прогнозирования.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00420 «Разработка модели эвтрофирования вод Таганрогского залива Азовского моря и оценка его экологического состояния»*

#### **Литература / References:**

1. Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. Mechanical-mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic media // Mech. Sol. 2013. V. 48. pp. 357–363.
2. Smith V.H., Tilman G.D., Nekola J.C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems // Envir. Pollut. 1999. V. 100 (1–3). pp. 179–196.
3. Zhidkova A.Y., Gusakova N.V. Assessment of the internal nutrient load on the waters of the Gulf of Taganrog of the Sea of Azov from the position of the eutrophication // Russ. J. Resources. Conserv. Recycl. 2017. V. 4(4). resources.today/PDF/04RRO417.pdf DOI 10.15862/04RRO417 [in Russian]
4. Zhidkova A.Y., Petrov V.V., Gusakova N.V. The Research of Waters Eutrophication of the Gulf of Taganrog of the Sea of Azov For Ecological Monitoring Purposes Exploration and Monitoring of the Shelf Underwater Environment. Abbasov I.B. (ed.). Wiley-Scrivener, 2018. 318 p.
5. Агапов А.А. Принципы построения автоматизированной информационно-управляющей системы регулирования промышленной безопасности // Безоп. Тр. Промышл. 2000. № 6. С. 15–19.
6. Карпов V.S., Panarin V.M., Gorjunkova A.A. Information and measuring system monitoring of pollution atmospheric boundary layer developed regions. Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. С. 173–182.



## ШЕРОХОВАТОСТЬ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ФОРМИРУЕМАЯ ВОЛНАМИ РАЗНЫХ МАСШТАБОВ

А.С. Запезалов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, sevzepter@mail.ru

Шероховатость морской поверхности является ее основной характеристикой, определяющей отражение радиоволн. Зеркальное отражение создают поверхностные волны, длина которых много больше длины радиоволны. Характер взаимодействия радиоволн с морской поверхностью определяет задачу построения зависимости дисперсии уклонов в заданном диапазоне длин волн. Будем рассматривать диапазон с переменной границей: от самых длинных до волн длиной  $\lambda_0$ . В отличие от ранее проведенных исследований [1], где анализировалась дисперсия модуля уклона, здесь рассматривается двумерное волновое поле.

Для построения зависимости компонент уклонов от масштабов создающих их волн используем синтез данных, полученных с помощью разных типов аппаратуры [2]. В силу технических особенностей измерительной аппаратуры эти данные позволяют определить дисперсию уклонов в разных диапазонах длин волн. Использовать данные измерений *in situ* (измерения лазерными уклономерами, струнными датчиками, волнографическими буйами), а также оценки уклонов, полученные в результате дистанционного зондирования в радио и оптическом диапазонах.

При описании зависимости дисперсии уклонов  $\sigma^2$  от длины  $\lambda_0$  принято использовать ее представление в виде части общей дисперсии уклонов, созданных волнами всех масштабов  $\sigma_{All}^2$

$$\sigma^2(\lambda_0) = \chi(\lambda_0) \sigma_{All}^2. \quad (1)$$

Для оценки параметра  $\sigma_{All}^2$  используются данные пассивного зондирования в оптическом диапазоне [3]. Поскольку длина световой волны меньше длины самой короткой поверхностной волны, то зеркальное отражение создают все присутствующие на поверхности волны.

Зависимости  $\chi = \chi(\lambda_0)$  представлены на рис. 1. Они соответствуют оценкам, рассчитанным для продольной и поперечной относительно направления ветра компоненты уклонов (индексы  $u$  и  $c$  соответственно). Значение параметра  $\lambda_0$  для каждого типа аппаратуры не поддается точной оценке [1], поэтому представленные на рис. 1 зависимости построены для двух предельных значений  $\lambda_{01}$  и  $\lambda_{02}$ , между которыми находится  $\lambda_0$ .

Рассчитанные по представленным на рис. 1 данным измерений регрессионные зависимости имеют вид [2]

$$\chi_u(\lambda_{01}) = 0.245 \lambda_{01}^{-0.202}, \quad (2)$$

$$\chi_u(\lambda_{02}) = 0.292 \lambda_{02}^{-0.177}, \quad (3)$$

$$\chi_c(\lambda_{01}) = 0.219 \lambda_{01}^{-0.220}, \quad (4)$$

$$\chi_c(\lambda_{02}) = 0.266 \lambda_{02}^{-0.193}. \quad (5)$$

При построении регрессий (2)-(5) учитывалось, что минимальная длина поверхностных волн ограничена процессами вязкой диссипации волновой энергии. Вязкий срез в волновом спектре имеет место на масштабе, соответствующем  $\lambda_{dis} \approx 0.001$  м [4]. Предполагалось, что при  $\lambda_0 = \lambda_{dis}$  параметр  $\chi \equiv 1$ .

Следует отметить, что представленные на рис. 1 зависимости  $\chi = \chi(\lambda_0)$  получены для ситуации, когда скорость ветра превышает 8 м/с. Это обусловлено тем, что характер изменения шероховатости различен в разных диапазонах скоростей ветра. При слабом



ветре с ростом его скорости шероховатость меняется значительно сильнее, чем при сильном [5].

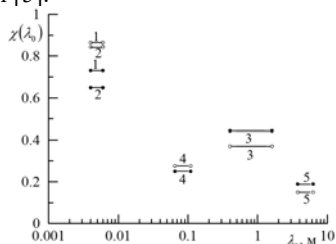


Рисунок 1. Зависимости  $\chi = \chi(\lambda_0)$ . Черные кружки – продольная компонента, белые кружки – поперечная компонента. Оценки 1 и 2 получены соответственно по измерениям движущимся и неподвижным лазерным уклономером; 3 – струнным волнографом; 4 – радаром; 5 – волнографическим бумом [2].

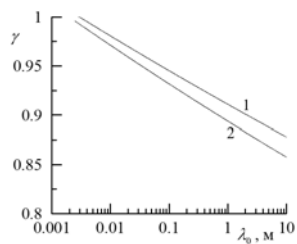


Рисунок 2. Зависимости  $\gamma = \gamma(\lambda_0)$ . Зависимость 1 соответствует  $\lambda_{02}$ ; зависимость 2 соответствует  $\lambda_{01}$ .

Регрессии (2)-(5) позволяют оценить изменения анизотропии уклонов морской поверхности. Введем параметр.

$$\gamma = \sigma_c^2(\lambda_0) / \sigma_u^2(\lambda_0). \quad (6)$$

Результаты расчетов параметра  $\gamma$  для  $\lambda_{01}$  и  $\lambda_{02}$  представлены на рис. 2.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений»*

### Литература / References:

1. Запевалов А.С. Распределение дисперсии уклонов морской поверхности по пространственным диапазонам, создающих их волн // Совр. Пробл. Дистанц. Зондир.Земли из Космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 211–219.
2. Запевалов А.С., Шумейко И.П., Абрамович А.Ю. Зависимости характеристик компонент уклонов морской поверхности от пространственных диапазонов, создающих их волн // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 5 DOI 10.30898/1684-1719.2020.5.15
3. Cox С., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Optical. Soc. Am. 1954. V. 44 (11). pp. 838–850.
4. Apel J.R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter // J. Geophys. Res. 1994. V. 99 (C8). pp. 16269–16291.
5. Zapevalov A.S. Statistical characteristics of the moduli of slopes of the sea surface // Phys. Oceanogr. 2002. V. 12 (1). pp. 24–31.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧКИ СУДНА НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

**Е.Г. Запевалов**

*Балтийский технический университет “Вoenmex” им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Zapevalov-2@list.ru*

Исследования воздействия морских поверхностных волн на корпус судна являются актуальными для решения широкого круга задач, связанных с проектированием

конструкции корпуса судна, обеспечением безопасности судовождения, швартовкой и др. Качка является нежелательным процессом, что определяет необходимость ее детального исследования, с целью учета ее последствий.

При анализе воздействия волн на судно принято рассматривать две ситуации, когда волнение является регулярным и нерегулярным. В случае регулярного волнения оно описывается синусоидальной волной и воздействие на судно (поперечная составляющая  $Y$  и вращающий момент  $M$ ) можно описать как [1]

$$Y = Y_0 \alpha_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

$$M = M_0 \alpha_0 \sin(\omega t), \quad (2)$$

где  $Y_0$  и  $M_0$  – амплитуды поперечной силы и момента,  $\alpha_0$  – средний угол волнового склона,  $\omega$  – частота волны. Угол волнового склона равен  $\alpha_0 = kA_0$ , где  $A_0$  – амплитуда волны. Частота  $\omega$  связана с волновым числом  $k$  дисперсионным соотношением для гравитационных волн

$$\omega^2 = gk, \quad (3)$$

где  $g$  – гравитационное ускорение.

Если волнение является нерегулярным, то морскую поверхность представляют в виде линейной суперпозиции невзаимодействующих между собой волн, каждая из которых подчиняется дисперсионному соотношению (3). В рамках этого представления переходят к спектру поверхностных волн. Полагая, что все воздействия линейно связаны с волнением, среднее значение и дисперсию любого воздействия рассчитывают по формулам (см. [2] и библиографию к ней)

$$\bar{X} = \int_0^{\infty} \frac{X}{\xi_0^2} S(\omega) d\omega, \quad (4)$$

$$D = \int_0^{\infty} \frac{|\tilde{X}|}{\xi_0} S(\omega) d\omega, \quad (5)$$

где  $\tilde{X}$  – разность между самим воздействием и его средним значением;  $\xi_0$  – амплитуда волновых ординат. По мнению авторов [2], главным здесь является описание морской поверхности в спектральной форме.

Модель волнового спектра задается а priori. Поле морских волн зависит от большого числа факторов, таких как скорость ветра, его продолжительность и стабильность, длина разгона и др. Практически вся энергия поверхностных волн сосредоточена в окрестности спектрального пика. Это позволяет параметризовать воздействие на судно такими характеристиками как высота волн (дисперсия возвышений) и их средний период (средняя частота).

Недостатком использования волновых спектров при моделировании воздействия нерегулярного волнения на судно является то, что не учитывается фундаментального свойства поверхностных волн – их групповая структура. Когерентность возвышений поверхности в двух точках волнового поля быстро уменьшается с ростом расстояния между этими точками [3], что в частности связано с следующим из дисперсионного соотношения (3) различием фазовой и групповой скоростей. Это означает, что характеристики каждой последующей волны отличаются от характеристик предыдущей, соответственно разным оказывается воздействие этих волн на корпус судна.

Для описания групповой структуры можно использовать модель, предложенную в работе [4],

$$\eta(x, t) = AG(x, t) \left\{ \xi(x, t) - \overline{\xi(x, t)} \right\}, \quad (6)$$

где  $A$  – параметр, определяющий высоты волн; черта сверху означает осреднение; огибающая  $G(x, t)$  и несущая волна  $\xi(x, t)$  описываются выражениями

$$G(x, t) = \exp \left[ -\rho_1 \cos^2 \left( \frac{k_0 x - (\omega_0 / 2)t}{2\rho_2} \right) \right], \quad (7)$$

$$\xi(x, t) = \exp \left[ -\rho_0 \cos^2 \left( \frac{k_0 x - \omega_0 t}{2} \right) \right], \quad (8)$$

где  $k_0$  и  $\omega_0$  – волновое число и циклическая частота несущей волны; параметры  $\rho_1$  и  $\rho_2$  определяют форму огибающей и число волн в группе; параметр  $\rho_0$  определяет асимметрию несущей волны. Примеры модельных расчетов представлены на рис. 1. Расчеты проведены для двух значений параметра  $\rho_0$ , что позволяет показать изменение профиля несущей волны.

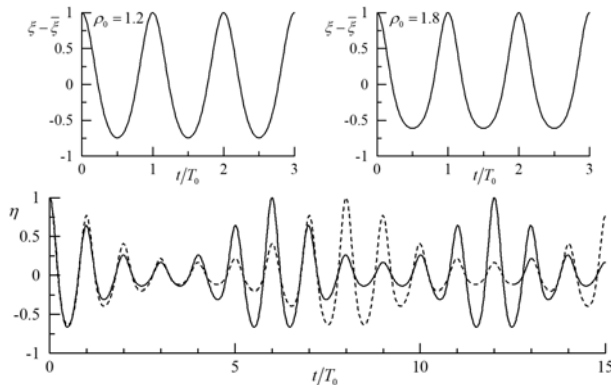


Рисунок 1. Профили волн  $\xi(t)$  и  $\eta(t)$ .

На фрагменте в нижней части рис. 1 показаны волновые профили с разным числом волн в группе. При построении рис. 1 использовалась нормировка возвышений морской поверхности, в соответствии с которой максимальное значение равно 1, безразмерный параметр  $t/T_0$  соответствует времени, измеренному в периодах несущей волны.

Следует отметить, если задавать волновое поле в форме (6) – (8), то используются две основные его характеристики: частота и амплитуда, а также дополнительные параметры, характеризующие отклонения волнового профиля от синусоидальной волны. Если использовать описание волнового поля в спектральной форме, то также задаются те же две характеристики: частота спектрального пика и дисперсия возвышений морской поверхности. То есть модель (6) – (8) полнее описывает нерегулярность волнения.

Таким образом, оставаясь в рамках представления судна, как линейной динамической системы [5], нерегулярность морского волнения можно учесть, задавая его групповую структуру.

### Литература / References:

1. Юдин Ю.И., Иванов В.В. Переменные составляющие воздействия регулярного волнения на корпус судна // Вестн. Мурман. Гос. Тех. Ун-та. 2011. Т. 14. №3. С. 471–476.
2. Иванов В.В. Определение параметров силового воздействия нерегулярного волнения на корпус судна // Вестн. Мурман. Гос. Тех. Ун-та. 2011. Т. 14. №3. С. 477–480.
3. Запелов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е. Исследования уровня когерентности морских

- поверхностных волн // Известия РАН. ФАО. 2004. Т. 40 (4). С. 545–549.
4. Запевалов А.С. Моделирование групповой структуры поверхностных волн // Процессы в геосредах. 2017. № 2 (11). С. 497–502.
5. Ремез Ю.В. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1983. 328 с.



## **ГЕОИНЖИНИРИНГ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ**

**В.М. Захаров<sup>1</sup>, С.П. Перов<sup>1</sup>, В.И. Уйбо<sup>2</sup>, Г.М. Крученицкий<sup>1</sup>, К.В. Показеев<sup>3</sup>,  
Л.С. Ивлев<sup>4</sup>, В.П. Челибанов<sup>1</sup>, Ю.П. Чукова<sup>1</sup>, Н.С. Сидоренков<sup>4</sup>, В.В. Борог<sup>5</sup>,  
В.В. Цетлин<sup>6</sup>, В.Г. Каверин<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Центральная аэрологическая обсерватория, Москва, [sperov35@mail.ru](mailto:sperov35@mail.ru)

<sup>2</sup> Народная Академия дипломатий, Москва, [uybo@yandex.ru](mailto:uybo@yandex.ru)

<sup>3</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, [sea@phys.msu.ru](mailto:sea@phys.msu.ru)

<sup>4</sup> Гидрометцентр России, Москва, [sidorenkov37@mail.ru](mailto:sidorenkov37@mail.ru)

<sup>5</sup> НИЯУ МИФИ, Москва

<sup>6</sup> Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, [tsetlin@mail.ru](mailto:tsetlin@mail.ru)

<sup>7</sup> ПАО «Энергия», Калининград, Московская обл.

Проблема активных воздействий и перспективы их применения для регулирования погоды и климата, называемого геоинжинирингом, ранее обсуждалась в [1]. Научный, глубоко физический подход к этой проблематике выразил Дж. Томсон еще в 1955 г. в книге «Предвидимое будущее», оценив сроки ее решения к середине XXI века. «...существуют «запальные действия», когда небольшое количество энергии возрастает и производит совершенно несоизмеримый эффект. направляя другие, значительно более крупные источники энергии по каналам, в которые они в противном случае никогда не попали бы...». Изложена история развития физических и физико-химических методов воздействия на облака и туманы (СССР. 1922 г. США, Австралия. 1940-50 гг., СССР, 1948 г., до настоящего времени. Отмечена ведущая роль Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (с 1951 г. по настоящее время) в решении различных задач по воздействию на атмосферные процессы.

Кроме упомянутых физикохимических методов воздействия с помощью химреагентов и аэрозолей существует метод ионизации атмосферного воздуха, т.е. создания в нем однополярных объемных электрических зарядов [2–4]. Этот метод с использованием установки «Атлант» реализует идею Томсона о «запальных действиях» в энергонасыщенной ионно-аэрозольной низкотемпературной атмосферной плазме с большим выходом теплоты фазовых переходов водяного пара, и как следствие к изменению термодинамического и циркуляционного режима. Технология «Атлант» была разработана в России и базируется на ряде запатентованных изобретений (патенты РФ №№ 2144761, 2121260, 2161881, 2248115). Она предназначена для управления атмосферными процессами, определяющими состояние погоды в пределах локальных, и мезомасштабных территорий. Широкий спектр технологических возможностей позволяет осуществлять широкий круг задач по коррекции погоды и предотвращению неблагоприятных ситуаций. Успешность и эффективность технологии определяется географическим (и геологическим) положением данного региона и зависит от сезонной изменчивости метеоусловий и времени воздействия. Установлено, например, что активные разломы, проникающие в земную кору до 40–45 км и в мантийную литосферу до 100–140 км являются потоковыми источниками и генераторами различных флюидов, ионов, инфразвуковых волн и низкочастотного электромагнитного излучения.

Отмечена возможность «коротких замыканий» между электрическим полем разлома и ионосферой при повышении солнечной активности роста потенциала ионосферы. Однако для построения моделей, учитывающих все виды полей (включая гравитационное) еще мало исходных данных и это задача ближайшего будущего [1].

Одной из главных характеристик любого метода воздействия на атмосферу является его эффективность и достоверность оценки полезного эффекта [1]. Так например для широко известной и примененной с успехом в различных странах установки отечественной разработки «Атлант» был специально разработан, исследован и запатентован на международном уровне экспериментальный метод оценки эффективности воздействия. и внедрен в практику в Омане [6]. Эксперименты в Германии, Швейцарии, Японии, Ю. Корее, ОАЭ, Австралии, Турции, Египте дали богатый материал для анализа различных синоптических ситуаций с точки зрения эффективности воздействия.

Обсуждаются некоторые фундаментальные вопросы термодинамики атмосферы, которые накладывает ограничение на преобразование энергии электромагнитного излучения в свободную энергию [5]. Поэтому особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку технологий воздействия с максимально возможным КПД как в глобальном (проблема максимальной сложности), так и региональном масштабе (засухи, наводнения, тайфуны).

Представлен обзор работ по успешному применению технологии Атлант в различных странах. Таким образом, многолетние исследования позволяют считать, что проблема научного обоснования и эффективности технологии активного воздействия на атмосферу, реализованная в системе Атлант решена. Теперь дело за ее аттестацией и внедрением. В ближайшее время планируется получение лицензии на проведение независимых испытаний.

#### **Литература / References:**

1. Перов С.П., Показеев К.В. О физических механизмах климатической изменчивости. В: Современные глобальные изменения природной среды. Т.4. Факторы глобальных изменений. М.: Научный мир, 2012. С. 88–121.
2. Перов С.П., Показеев К.В., Уйбо В.И. Ионизационный метод воздействия на атмосферу. Третья международная научная школа молодых ученых // Матер. Шк. «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах». М.: ИПМех РАН, 2017. С. 164–165.
3. Ивлев Л.С., Перов С.П., Уйбо В.И., Борог В.В., Доронин А.П., Довгалюк Ю.А., Челибанов В.П. Активный мониторинг природных сред. СПб, ВВМ, 2014. 267 с.
4. Ивлев Л.С., Уйбо В.И., Перов С.П., Челибанов В.П. Электромагнитные методы воздействия на природную среду. СПб, ВВМ, 2017. 501 с.
5. Чукова Ю.П. От М. Планка, А. Эйнштейна и Л. Ландау до Римского клуба. М.: Мегapolis, 2020. 216 с.
6. Видеофильм об использовании технологии Атлант в Омане <https://vimeo.com/114943575>



**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ОТ НАВОДНЕНИЙ НА ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕВСКОЙ ГУБЫ В ПЕРИОД СИЛЬНОГО ШТОРМОВОГО НАГОНА 1-2 ОКТЯБРЯ 2019 г.**

**Е.В. Захарова<sup>1,2</sup>, В.В. Фомин<sup>1,3</sup>, Н.А. Дианский<sup>1,2,3</sup>, Е.М. Ладохина<sup>4,5</sup>, К.Г. Рубинштейн<sup>5,6</sup>**

<sup>1</sup> Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва

<sup>2</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

<sup>3</sup> Институт вычислительной математики РАН, Москва

<sup>4</sup> ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», Санкт-Петербург

<sup>5</sup> ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва

<sup>6</sup> Институт проблем безопасности развития атомной энергетики РАН, Москва

Сгонно-нагонные колебания на акватории Финского залива могут приводить к значительному повышению уровня моря в восточной части залива и наводнениям в Санкт-Петербурге [1]. Для защиты города от наводнений был построен комплекс защитных сооружений (КЗС), который включает в себя 11 защитных дамб, два судопропускных сооружения и шесть водопропускных сооружений [<https://dambaspb.ru>]. При возникновении угрозы наводнения створы на водо- и судопропускных сооружениях опускаются, прекращается водообмен между Невской губой и открытой частью Финского залива. Точное воспроизведение морской циркуляции и сгонно-нагонных колебаний на акватории Финского залива численными моделями позволяет заблаговременно определить промежуток времени, в течение которого створы КЗС следует закрыть и играет важную роль при прогнозировании наводненческих ситуаций.

В настоящее время в Северо-Западном УГМС основным методом оперативного расчета сгонно-нагонных колебаний уровня на акватории Балтийского моря служит программный комплекс (ПК) CARDINAL [2]. По решению ЦМКП от 23 октября 2019 г. в качестве вспомогательного метода введен ПК, основанный на региональной негидростатической атмосферной модели WRF-ARW (Weather Research and Forecasting Model) [3] и модели морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [4]. Модель WRF-ARF используется для расчета атмосферного воздействия как в модели INMOM, так и в ПК CARDINAL. Однако, в отличие от CARDINAL, где используется двумерная модель мелкой воды, модель INMOM является трехмерной моделью, в основе которой лежит система примитивных уравнений в приближениях гидростатики и Буссинеска. Модель INMOM позволяет, кроме уровня моря и осредненных по вертикали течений, рассчитывать трехмерную структуру течений, температуры и солёности. Кроме того, в INMOM инкорпорирована модель динамики и термодинамики морского льда, что позволит в будущем предоставлять прогностические поля ледовых характеристик.

Модель WRF-ARW была адаптирована для Балтики. Количество расчетных узлов сетки по модельным долготе и широте 329 x 329. Шаг по горизонтали равномерный и составляет 10x10 км. По вертикали модель содержит 35 неравномерно распределенных уровней. Для воспроизведения гидротермодинамических характеристик на акватории Балтийского моря в период штормового нагона 1-2 октября в восточной части Финского залива использовалась  $\sigma$ -модель общей циркуляции океана INMOM [4] для Балтийского моря. Модель реализована в повернутой сферической системе координат – ее северный

полюс помещен в Санкт-Петербург. Модельная область охватывает акваторию Балтийского моря, жидкая граница проходит в Датских проливах. Общее количество расчетных узлов 555 x 1315 по модельным долготе и широте. Шаг по пространству не равномерный: на акватории Невской губы он равен 100–150 м, а в юго-западной части Балтийского моря составляет около 6 км. Такая конфигурация узлов сетки в модели позволяет без использования вложенных сеток и задания граничных условий на «жидкой границе» рассчитывать прогностические поля с приемлемым пространственным разрешением на всей акватории Балтийского моря. По вертикали модель содержит 20 неравномерно распределенных  $\sigma$ -уровней. Прогностическими переменными модели являются соленость, потенциальная температура, горизонтальные компоненты скорости течений, отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности. Дискретность выдачи результатов расчетов составляет 1 час. Ранее региональная версия модели INMOM для Азовского моря уже была успешно применена для задач прогноза сгонно-нагонных явлений в Таганрогском заливе [6].

Для модели циркуляции Балтийского моря был реализован способ аппроксимации закрытия/открытия водо- и судопропускных створов КЗС, позволяющий проводить численные эксперименты по изучению влияния КЗС на гидротермодинамику Невской губы.

В рамках исследования был рассмотрен штормовой нагон с 1 по 2 октября 2019 года. Была проанализирована синоптическая ситуация, которая привела к значительному повышению уровня моря в восточной части Финского залива. Своевременно было выпущено предупреждение Северо-Западным УГМС об угрозе наводнения и створы КЗС в период наиболее опасного повышения уровня закрывались.

С помощью модели INMOM были проведены два параллельных расчета: без закрытия створов КЗС (Эксп1) и с их закрытием (Эксп2) в соответствии с выпускаемыми предупреждениями с 04 UTC до 15 UTC 1 октября.

Во время шторма 1 октября 2019 г. к северу от Финского залива отмечалось прохождение мощного циклона с давлением в центре менее 980 гПа, наблюдалось значительное усиление скорости западного ветра над акваторией Финского залива.

По результатам численных расчетов по модели INMOM [7] было показано влияние закрытия створов КЗС на уровень моря, структуру течений, температуру и соленость. Также была произведена оценка качества воспроизведения моделью уровня моря. Для этого было проведено сравнение значений уровня моря, полученных по Эксп1 и Эксп2, с наблюдаемыми значениями на станциях «Горный институт» и «Кронштадт» (рис. 1). Из графиков рис. 1 видно, что Эксп2 с высокой точностью воспроизводит уровень моря в период шторма. Из данных наблюдений на уровне поста «Горный институт» видно, что после открытия КЗС уровень вырос на величину порядка 15 см, что свидетельствует о преждевременном открытии створов. Этот скачок уровня был качественно воспроизведен моделью INMOM. При этом сразу после открытия водо- и судопропускных створов модельный нагон в Невской губе несколько превышает наблюдаемый.

Результаты расчетов Эксп1 и Эксп2 модели INMOM в период штормового нагона 1-2 октября 2019 г. показали, что закрытие створов КЗС в период штормового нагона приводит к увеличению подъема уровня моря на величину порядка 10 см в восточной части Финского залива к западу от КЗС, а также позволяет ограничить подъем уровня моря в пределах акватории Невской губы к востоку от КЗС на величину порядка 40–50 см. При закрытии КЗС и приостановке водообмена, в структуре течений отмечается формирование более выраженной замкнутой антициклональной циркуляции в пределах акватории Невской губы.

Основной вклад в пространственное распределение солёности на акватории Невской губы вносит сток пресных вод Невы и преобладающие направления течений в поверхностном слое воды. Закрытие створов КЗС приводит к снижению солёности вод акватории Невской губы вблизи от КЗС на величину до 5–7‰ по Эксп2 в сравнении с Эксп1. Это обусловлено прекращением поступления более солёных вод Финского залива в период штормового нагона в Невскую губу, а также стоком опресняющих вод Невы.

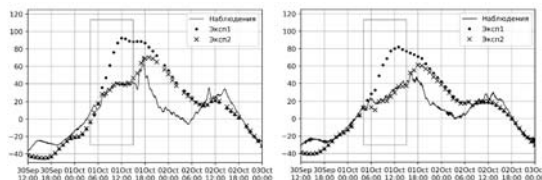


Рисунок 1 Отклонения уровня моря (см) от среднего (за период с 10 сентября по 3 октября 2019 г.) для уровневных постов «Горный институт» (а) и «Кронштадт» (б). Эксп1 – без учета закрытия створов КЗС; Эксп2 – с учетом. Серой рамкой обозначен период, во время которого затворы КЗС были закрыты.

Изменение пространственной структуры поля температуры главным образом связаны с изменением характера циркуляции, косвенное влияние может оказывать и сток реки Нева. Воды Невской губы имеют пониженную температуру в сравнении с акваторией Финского залива к западу от КЗС, что характерно для осеннего периода. В период закрытия створов КЗС (Эксп2) из-за существенного поднятия уровня моря прекращается поступление более теплых вод из Финского залива в Невскую губу и температура воды в поверхностном слое в Невской губе снижается на величину до 1.5–2.0 °С по сравнению с условиями Эксп1 вблизи защитных сооружений к северу от о. Кронштадт.

*Работа выполнена в рамках темы 4.6 Плана НИТР Росгидромета (утв. Приказом Росгидромета №745 от 31.12.2019) «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга гидрохимического состояния и загрязнения морей России и оценки гидрологического и гидрохимического состояния морей и морских устьев рек».*

#### Литература / References:

1. Захарчук Е.А., Тихонова Н.А. О механизмах формирования невыхских наводнений // Тр. ГоИН. 2011. № 213. С. 155–168.
2. Клеванный К.А., Смирнова Е.В. Использование программного комплекса CARDINAL // Журн. Унив. Водных Коммуникаций. 2009. Вып. 1. С. 153–162.
3. Skamarock A. Description of the Advanced Research WRF, Version 3. NCAR Technical Notes. 2008.
4. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
5. Фомин В.В., Дианский Н.А. Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана // Метеорол. Гидрол. 2018. № 12. С. 69–80.
6. Попов С.К., Гусев А.В., Фомин В.В. Вторичный максимум уровня моря в наводнениях в Санкт-Петербурге и его воспроизведение в численных моделях // Метеорол. Гидрол. 2018. № 12. С. 48–60.
7. Захарова Е.В., Фомин В.В., Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Дианский Н.А. Изучение влияния комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений на гидротермодинамические характеристики Невской губы в период сильного штормового нагона 1-2 октября 2019 г. // Процессы в геосредах. 2020. №3(25). С. 787–796.





## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА**

*А.Г. Зацепин, А.Г. Островский, С.В. Волков, О.Ю. Кочетов, Д.А. Швоев  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва*

В докладе представлены предварительные результаты разработки автоматизированной 3-х уровневой (верхний слой океана – лед – приземный слой атмосферы) системы оперативного мониторинга Северного Ледовитого океана. Для мониторинга состояния морской среды предлагается передовая технология подледных зондирований с помощью автономных роботизированных комплексов. Данная технология должна быть реализована в создании действующего макета автономной ледовой дрейфующей станции, состоящей из: 1) подводного перемещающегося вверх-вниз носителя, который оснащен СТД-зондом и акустическим доплеровским профилографом течений (носитель перемещается по тросу с грузом на конце, опущенном с ледовой платформы, а данные с носителя передаются оперативно на соответствующий плавучий модуль на ледовой платформе с помощью индуктивной врезки в ходовой трос), 2) метеостанции (температура воздуха + атмосферное давление) с системой спутниковой связи Гонец-М или Iridium и навигации GPS/Глонасс на плавучем буе-держателе, размещенном на ледовой платформе.

Автономная ледовая дрейфующая станция разрабатывается в России впервые. Разработка будет основана на опыте создания заякоренного автоматического мобильного зонда. Данный зонд, разработанный в ИО РАН, производится уже более 8 лет, продавался в различные страны, работал в различных морях Европы и Азии, на юге и на севере, в том числе, в Карском море. Наиболее долго и плодотворно он работал на Черном море, в составе автономных станций, размещенных на гидрофизическом полигоне ИО РАН в районе Геленджика.

Результатом массового практического использования автономных дрейфующих ледовых станций может явиться создание системы оперативной океанографии Арктики. С помощью этой сети будут изучены разномасштабные закономерности эволюции морского ледяного покрова в условиях глобальных климатических изменений, в том числе, в целях оптимизации системы развертывания и поддержания сети оперативных наблюдений. Многолетнее использование предлагаемой автоматизированной мониторинговой системы позволит проследить изменения климата Арктики в первой половине XXI века в трех средах: воздушной, ледяном покрове и морской водной толще.

*Работа выполнена в рамках госбюджетной темы 0149-2019-0011 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-60124.*



---

## **ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ВИХРИ НАД НЕОСЕСИММЕТРИЧНЫМ ВОЗМУЩЕНИЕМ РЕЛЬЕФА ДНА**

*В.Н. Зырянов, В.М. Егорова*

*Институт водных проблем РАН, Москва, v.n.zuryanov@yandex.ru, vikchik96@yandex.ru*

В Левантийском бассейне к югу от острова Кипр располагается очень необычное и относительно устойчивое вихреобразование — теплый Кипрский вихрь, названный так в [1]. Результаты натуральных наблюдений Кипрского вихря были хорошо освещены в [1–3]. Кипрский вихрь исследовался и в рамках проекта СУВО [4, 5], а также проекта EU

CYCLOPS [3, 4, 6].

Из экспедиций, проводимых на океанических судах с 1979 г., стало известно, что Кипрский вихрь, влияние которого распространяется на глубины до 400 м, представляет собой одну из наиболее интенсивных (скорости течений до 30 — 35 см/с) динамических антициклонических особенностей открытого моря в Юго-Восточном Левантийском бассейне. Солёность вод вихря превышает средние показатели солёности Средиземного моря (38‰) и может достигать значений в 39.2‰ в зимние месяцы и 39.7‰ в летние; Кипрский вихрь является теплым вихрем, на 2–5°C превышает температуру окружающих вод [3, 7, 8].

В работе ставится две задачи. Одна задача — получить стационарную картину Кипрского вихря, другая, не менее важная, — проследить его эволюцию во времени. С этой целью наряду с аналитическими исследованиями был использован численный метод контурной динамики (МКД) для описания эволюции Кипрского вихря. Метод контурной динамики был развит впоследствии. За последние десятилетия МКД активно развивался применительно к задачам геофизической гидродинамики [9–11].

МКД позволяет рассчитывать эволюцию свободных вихрей океана и их взаимодействие с топографическими вихрями. Это представляет большой интерес, так как под свободным вихрем можно понимать пятно пассивной примеси постоянной завихренности (например, нефтяное пятно). Экологическая проблема нефтяного загрязнения воды (антропогенного и естественного) является одной из самых распространенных в мире и угрожает сегодня Мировому океану.

**Аналитическое описание Кипрского вихря.** Для исследования топографической природы Кипрского вихря был использован массив топографии дна восточной части Средиземного моря, полученный из Океанографического Центра Университета Кипра в Никосии. Топография в этом районе оказалась довольно сложной. К югу от острова Кипр на глубине около 1.5 км находится удивительное сложносоставное возмущение рельефа дна — массивная подводная гора Эрастотена, имеющая линейный масштаб порядка 50 км. С севера и запада гору окаймляет глубокий каньон, простирающийся на 100 км к западу. Подводная возвышенность находится у юго-восточной границы глубокой безымянной впадины (рис. 1). На основе проведенного анализа батиметрии была сформулирована математическая постановка задачи — параболическая впадина радиуса  $R_1$  с выступающей из нее параболической горой меньшего радиуса  $R_2$ , сдвинутой относительно центра впадины (рис. 2). Задача обтекания такой неосесимметричной конструкции решалась в рамках баротропной и бароклинной моделей океана. Начальное условие - на подводное возмущение  $h(x, y)$  набегал однородный восточный поток  $\vec{V} = (U, 0, 0)$ ,  $U > 0$  (ось OY направлена на север по меридиану, ось OX — на восток вдоль круга широты, а ось OZ — вертикально вверх).

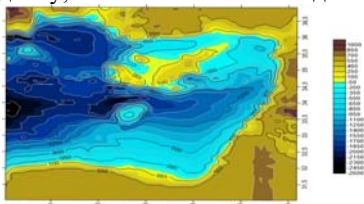


Рисунок 1. Батиметрическая карта Левантийского бассейна с горой Эрастотена к югу от острова Кипр, линейка градуирована в метрах.

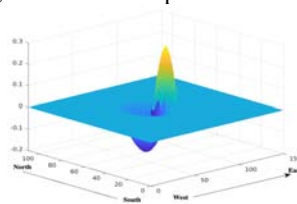


Рисунок 2. Модельное представление сложного неосесимметричного рельефа дна в задаче Кипрского вихря.

Задача обтекания подводных возмущений (подводных гор, впадин, вулканов и их комбинаций) в однородной жидкости сводится к нахождению функции давления  $P^{(0)}(x, y)$ , которая складывается из давления  $\bar{P}(y)$  в зональном потоке и из возмущения  $\psi(x, y)$  давления от возмущения рельефа дна с коэффициентом, которым выступает топографический параметр  $\bar{\sigma}$ . Из закона сохранения потенциальной завихренности для однородного океана имеем уравнение Гельмгольца

$$\Delta\psi(x, y) + \frac{b}{U}\psi(x, y) = h(x, y)$$

**Полученные результаты.** Проверка критерия стратификации показал [9], что бароклинные моды волн Россби не возникают. В результате решения задачи было получена система из двух вихрей — циклона и Кипрского антициклона, формирующихся над сложной неосесимметричной структурой возмущения рельефа дна (рис. 3). Масштабы антициклонического вихря получились близкими к реальным размерам Кипрского вихря 50–60 км. На рис. 3 показано изменение вихрей с глубиной и в пространстве – чем ближе циклон и антициклон ко дну, тем больший линейный масштаб они имеют. Получается, что стратификация прижимает вихревое возмущение ко дну. Это свидетельствует о тенденции вихрей к принятию конусовидной формы, превращению в усеченные конусы Тейлора-Хогга [9].

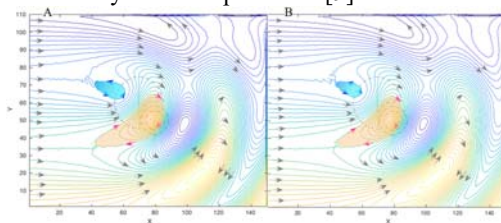


Рисунок 3. Вид изолиний течений в стратифицированной задаче Кипрского вихря на разных глубинах (Кипрская подводная система обозначена штрихом, Кипрский вихрь - рыжая область, циклон - синяя): А)  $z = 0.6$  (920 м); В)  $z = 0$  (20 м).

**Заключение.** В процессе анализа решений в баротропном и бароклинном океанах была выявлена роль стратификации вод Левантийского бассейна. Стратификация ответственна за возникновение и эволюцию мезомасштабных вихрей Левантийского региона: вихри сужаются к поверхности океана, представляя собой усеченные конусы Тейлора-Хогга, и горизонтально сильно смещаются. Стратификация региона может приводить к значительным горизонтальным смещениям вихрей.

Исследования вертикальных движений в области топографического Кипрского вихря, в частности анализ спиральности течения в стратифицированной задаче, позволили подтвердить причину теплой природы этого знаменитого вихреобразования — опускание теплых прогретых вод на дно в непосредственной близости от вихря. Холодное пятно и циклон, наблюдаемые со спутников рядом с антициклоническим Кипрским вихрем, объясняются в настоящей работе возникающей областью апвеллинга. Расчеты вертикальных скоростей опровергли предположения о слабых вертикальных движениях в вихревых структурах.

Применение мощного численного метода, метода контурной динамики (МКД), к задаче описания эволюции Кипрского вихря позволила дополнить результаты аналитического моделирования. Серии численных экспериментов МКД по взаимодействию свободных вихрей разных форм, размеров и завихренности с вихревой Кипрской структурой привели к выводу, что Кипрский вихрь является одним из «островов мусора» Мирового океана – имеется большая вероятность захвата части

набегающего вихревого пятна антициклоническим топографическим вихрем.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-05-00522а).*

### **Литература / References:**

1. Brenner S. Structure and evolution of warm core eddies in the eastern Mediterranean Levantine Basin // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. pp. 12.593–12.602.
2. Hecht A., Robinson A., Pinardi N. Currents, water masses, eddies, and jets in the Mediterranean Levantine Basin // *J. Phys. Oceanogr.* 1998. V. 8. pp. 1320–1353.
3. Brenner S., Rozenraub Z., Bishop J., Krom M. The mixed-layer/thermocline cycle of a persistent warm core eddy in the eastern Mediterranean // *Dyn. Atm. Oceans.* 1991. V. 15. pp. 457–476.
4. Zodiatis G., Hayes D., Gertman I., Poulain P.-M., Menna M., Nicolaidis A. On the main flow features of the SE Levantine (CYBO cruises 1995e2012) // *Geophys. Res. Abstr.* 2013. V. 15. EGU2013e9861
5. Zodiatis G., Drakopoulos P., Brenner S., Groom S. Variability of the Cyprus warm core Eddy during the CYCLOPS project // *Deep-Sea Res.* 2005. V. 52. Pt.2. pp. 2897–2910.
6. Groom S., Herut B., Brenner S., Zodiatis G., Psarra S., Kress N., Krom M.D., Law C.S., Drakopoulos P. Satellite-derived spatial and temporal biological variability in the Cyprus Eddy // *Deep-Sea Res. II.* 2005. V. 52. pp. 2990–3010.
7. Hayes D.R., Hannides A., Zodiatis G., Georgiou G., Gildor H., Testor P. Description of the Long-lived Subsurface Mesoscale Eddy South of Cyprus. Presented // In: 6<sup>th</sup> Everyone's Gliding Observatories (EGO) Meeting, Kiel, 2014.
8. Samuel-Rhoads Y., Zodiatis G., Hayes D., Georgiou G. Mediterranean sea surface temperature rise in the period 1985-2008 // *Proc. 9th Int. Conf. Mediter. Coastal Envir. MEDCOAST 2009. Sochi, Russia.* V. 2. pp. 1017–1027.
9. Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М.: ИВП РАН, 1995. 240 с.
10. Козлов В.Ф. Модели топографических вихрей в океане. М.: Наука, 1983. 200 с.
11. Соколовский М.А. Моделирование трехслойных вихревых движений в океане методом контурной динамики // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1991. Т. 27. №5. С. 550–562.



---

## **КОМПЛЕКСНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКА СУММАРНОГО ПОТОКА ГАЗОВОЙ РАЗГРУЗКИ В ОБЛАСТИ МЕЛКОВОДНЫХ СИПОВ ВБЛИЗИ МЫСА ФИОЛЕНТ**

***И.Н. Иванова<sup>1</sup>, А.А. Будников<sup>1</sup>, Т.В. Малахова<sup>2</sup>, А.И. Мурашова<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup> МГУ имени М.В.Ломоносова, Физический факультет, Москва, ivair@yandex.ru,  
aa.budnikov@physics.msu.ru*

*<sup>2</sup> Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь,  
t.malakhova@imbr-ras.ru, alenatyra@mail.ru*

За последнее десятилетие в прибрежных районах Крымского полуострова был обнаружен ряд мелководных площадок на которых наблюдаются струйные пузырьковые газовыделения (холодные сипы) [1]. Установлено, что в газовом составе выделяющихся пузырьков преобладает метан, который может быть биогенного либо термокаталитического происхождения. Прибрежные сипы наблюдаются на глубинах от полутора до 30 и более метров, могут иметь различную интенсивность, периодичность и сезонность, а также отличаться характером высачиваний. Процесс пузырькового высачивания газа сопровождается, как правило, флюидной эмиссией из дна в некоторой области вокруг места выхода пузырьков, причем величина этого потока может быть сопоставима с объемом выделяющегося пузырькового газа [2]. Мониторинг площадок пузырьковых газовыделений позволяет уточнить оценки эмиссии метана с прибрежной акватории и определить закономерности функционирования мелководных сипов.

В августе 2019 г. в прибрежной зоне юго-западного Крыма у мыса Фиолент (44.522474 с.ш., 33.466825 в.д.) была обнаружена новая площадка сипов (Рис.1). Газохимические исследования показали, что в компонентном составе пузырькового газа преобладал метан биогенного происхождения. Область пузырьковых высачиваний располагается на глубине 2.5 м и представляет собой песчаное дно площадью около 20 м<sup>2</sup>, примыкающее к скале, которое имеет небольшой уклон от скалы вглубь бухты.



Рисунок 1. Карта-схема расположения мелководных сипов Крымского побережья у Гераклейского полуострова (слева, крупным маркером отмечена локация исследованного района) и фотография газовыделяющей площадки у мыса Фиолент (справа).

13 августа 2020 г. на данной площадке были проведены комплексные измерения гидрологических параметров. Измерения проводились непрерывно с 10.30 до 17.30 по местному времени. При помощи многопараметрического зонда RCM 9 LW AANDERAA INSTRUMENTS (Норвегия) измерялись температура  $T$ , электропроводность воды  $C_k$ , содержание растворенного кислорода  $O_2$ , мутность  $Tu$ . Точность измерений составляла 0.05°C, 0.02 мСм/см, 0.25 мг/л и 0.5 NTU (в международных единицах мутности), соответственно. Датчики прибора располагались над одной из точек выхода пузырьковых газовыделений на высоте 0.5 м от дна (рис. 2, а). Процесс газовыделения фиксировался при помощи видеокамеры GoPro4 с разрешением Full HD 1080p с одновременной записью аудиосигнала, производимого пузырьковой струей. Над аналогичной точкой выхода пузырьков была установлена газовая ловушка, представляющая собой цилиндрический пластиковый контейнер с открытым дном (рис. 2, б).

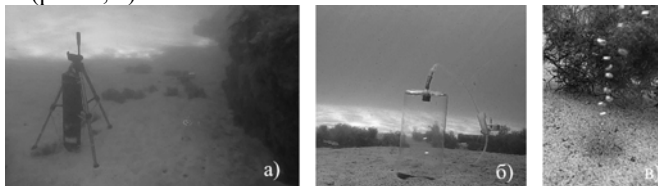


Рисунок 2. Подводные фотографии газвыделяющего района у мыса Фиолент: а) установленный над одной из точек газовыделений зонд RCM 9 LW AANDERAA INSTRUMENTS (Норвегия); б) газовая ловушка, установленная над сипом в) пузырьковые газовыделения из песка.

Всего на площадке во время проведения измерений наблюдалось 9 точек выхода пузырькового газа. Пузырьки выделялись струйками продолжительностью от 1 до 5 с, паузы между порциями газовыделений составляли от 2 с до минуты. Размер выделяющихся пузырьков составлял приблизительно 2 мм (рис. 2, в).

Видеозаписи пузырьковой разгрузки позволили провести оценку величины газового потока из одного точечного источника и аппроксимировать это значение на всю газовыделяющую площадку. Величина потока, оцененная таким образом,

составила около 60 л/сут со всей площадки. Также величина газового потока определялась на основе измеренной скорости наполнения газом ловушки. За полтора часа наблюдений ловушка наполнилась на 150 мл, что дало аппроксимационную оценку 22.5 л/сут с площадки. Таким образом, по порядку величины полученные оценки суммарного потока совпали.

Данные, полученные с использованием многопараметрического зонда, представлены на Рис.3. Показано изменение температуры  $T$  и концентрации растворенного кислорода  $O_2$  над метановым сипом в течение непрерывной 6-ти часовой записи. Перед началом проведения измерений над сипом и в конце измерений, в течение 20 минут измерения выполнялись на фоновой станции вблизи края песчаной площадки на максимально возможном удалении от сипов. Глубина на фоновой станции была на 0.3 м больше по сравнению с основной станцией.



Рисунок 3. График изменения температуры  $T$  (черный график) и концентрации растворенного кислорода  $O_2$  (серый график) в течение 6-часового непрерывного *in situ* мониторинга. Выделенная область показывает временной интервал, когда измерения проводились непосредственно над источником пузырькового газа.

В целом на протяжении всей записи над сипом, наблюдался рост значений с 7.1 мг/л до 8.2 мг/л и с 24.8 до 25.5 °C для  $O_2$  и  $T$ , соответственно. Отмечено два эпизода (в 13.30 и 14.30) скачкообразного увеличения скорости роста значений  $O_2$  и  $T$  с последующим снижением. Коэффициент корреляции для  $O_2$  и  $T$  составлял 0.76, что говорит о сильной связанности процессов, влияющих на изменение этих параметров. Значение солености, рассчитанное по данным измеренной электропроводности, практически не изменялось и составляло 18.4 ‰. Значение мутности находилось ниже порога чувствительности датчика. Вероятно, характер изменения температуры воды и содержания в ней кислорода определяется сильным перемешиванием вертикального слоя над площадкой.

Во время измерений у края площадки наблюдались более низкие значения содержания кислорода  $O_2$  и температуры  $T$  по сравнению со значениями над источником газа, что может свидетельствовать о различии гидродинамических условий в точке газовыделений и на фоновой станции, в частности, о более сильном перемешивании вертикальной толщи воды над самой площадкой.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-45-920057 p\_a.*

### Литература / References:

1. Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Егоров В.Н., Малахова Л.В., Артёмов Ю.Г., Евтушенко Д.Б., Гулин С.Б., Пименов Н.В. Микробные процессы и генезис струйных метановых газоразделений прибрежных районов Крымского полуострова // Микробиология. 2015. Т. 84. № 6. С. 743–752.
2. Torres M.E., McManus J., Hammond D.E., et al. Fluid and chemical fluxes in and out of sediments hosting methane hydrate deposits on Hydrate Ridge, OR, I: Hydrological provinces // Earth and Planetary Sci. Lett. 2002. V. 201 (3–4). pp. 525–540. DOI 10.1016/S0012-821X(02)00733-1



## ВЛИЯНИЕ ПЛАВАЮЩЕЙ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ НА СТОЯЧИЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ СОСУДЕ

*В.А. Калинин*

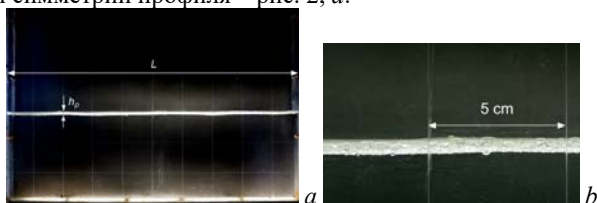
*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва kalin@ipmnet.ru*

Обсуждаются результаты экспериментов по влиянию плавающей пластины на процесс разрушения и регуляризацию стоячей гравитационной волны Фарадея на свободной поверхности воды в прямоугольном сосуде. Рассмотрен эффект увеличения толщины пластины на предельную крутизну регулярной волны и ее диссипативные свойства. Опыты продолжают цикл исследований автора [1–4] по выявлению возможных механизмов регуляризации разрушающихся гравитационных волн на свободной поверхности жидкости ограниченного объема.

Влияние плавающей пластины на колебания жидкости исследовалось для второй моды ( $n = 2$ ) стоячих гравитационных волн на свободной поверхности воды в прямоугольном сосуде длиной  $L = 50$  см и шириной  $W = 4$  см. В экспериментах использовались пластины из пенополиэтилена плотностью  $\rho_p = 2.5 - 3 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>. Модуль упругости материала согласно технической информации изготовителя составлял величину  $E \approx 2.6 \cdot 10^6$  дин/см<sup>2</sup> (0.26 МПа). Пластины имели длину 49.5 см и ширину 3.5 см; их толщина  $h_p$  изменялась от 0.09 до 0.6 см при глубине жидкости  $h = 15$  см (рис. 1).

Аналогично [1–4] исследовались двумерные волновые движения в режиме основного резонанса Фарадея, когда частота  $\Omega$  вертикальных колебаний сосуда в два раза превышала частоту возбуждаемых поверхностных гравитационных волн.

В экспериментах наблюдались регулярные и разрушающие волны. Для регулярных волн профиль периодичен во времени и симметричен относительно вертикальной плоскости, проведенной через пучность волны. Их предельная крутизна в случае воды достигает величины  $\Gamma = H / \lambda \sim 0.22$ ,  $H$  – высота волны,  $\lambda = L$  – длина волны (вторая волновая мода). Волны, у которых со свободной поверхности срываются отдельные капли, классифицируются как разрушающиеся волны Фарадея. Для этих волн характерен срыв капель со свободной поверхности при полном нарушении периодичности и симметрии профиля – рис. 2, а.



*Рисунок 1. Плавающая пластина из вспененного полиэтилена на поверхности воды в прямоугольном сосуде;  $L = 50$  см;  $h_p = 0.36$  см*

Размещение пластины из вспененного полиэтилена на поверхности воды кардинально меняет волновую картину – наблюдается регуляризация разрушающихся волн (рис. 2б). Крутизна показанной на рисунке волны составляет  $\Gamma \sim 0.33$ , что значительно превышает соответствующее значение для воды ( $\Gamma \sim 0.22$ ). Волновому профилю присущи периодичность и симметрия; какие-либо признаки разрушения отсутствуют.



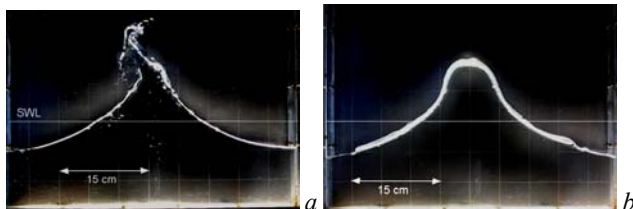


Рисунок 2. (а) Разрушающаяся волна Фарадея на поверхности воды,  $\Omega = 20.94 \text{ с}^{-1}$ . (б) Регулярная волна в случае тонкой упругой пластины ( $h_p = 0.36 \text{ см}$ ) на поверхности воды ( $\Omega = 20.94 \text{ с}^{-1}$ ,  $H = 16.5 \text{ см}$ ).

В экспериментах в качестве интегральной волновой характеристики использовались резонансные зависимости установившейся высоты волны  $H(\Omega)$  от частоты вертикальных колебаний сосуда – рис. 3.

Использование плавающей пластины значительно увеличивает предельную крутизну регулярной волны, как это показано на рис. 4. При увеличении толщины пластины наблюдается рост крутизны, и при  $h_p = 0.51 \text{ см}$  предельная крутизна равна  $\Gamma = H/\lambda \sim 0.4$  – данные (2). Для сравнения на рис. 4 приведены полученные в [3, 4] зависимости крутизны регулярной волны от толщины слоя вязкой жидкости (двухслойная жидкость, баротропные волны) и толщины слоя плавающих частиц.

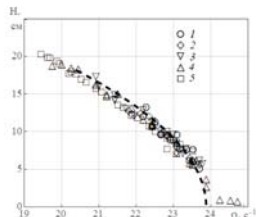


Рисунок 3. Резонансные зависимости  $H(\Omega)$  в случае регулярных волн: 1–5 – плавающая пластина,  $h_p = 0.085, 0.195, 0.255, 0.361, 0.51 \text{ см}$

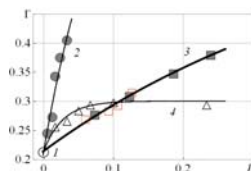


Рисунок 4. Зависимости предельной крутизны поверхностной волны от толщины пластины: 1 – вода; 2 – пластина; 3 – слой плавающих частиц [4]; 4 – растительное масло–вода [3];  $h^* = h_p / h$  для пластины/слоя частиц;  $h^* = h_1 / h$  для верхнего слоя вязкой жидкости при глубине двухслойной жидкости

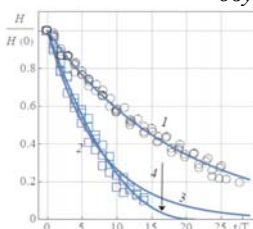


Рисунок 5. Амплитудные кривые затухающих волн на свободной поверхности воды (1) и гидроупругой системы пластина–вода (2): 1 – вода, экспоненциальное затухание,  $\exp(-0.06z)$ ; 2 – плавающая пластина,  $h_p = 0.361 \text{ см}$ ; 3 – экспоненциальное затухание,  $\exp(-0.133z)$ ; 4 – неэкспоненциальное затухание,  $(1 - z/21)^{2.2}$ .

Наличие плавающей пластины существенно увеличивает диссипативные характеристики рассматриваемой колебательной системы (рис. 5), причем наблюдается неэкспоненциальный характер затухания волновых движений жидкости. Аналогичный



характер затухания стоячей волны был выявлен в случае слоя плавающих частиц [4].

Представлены новые экспериментальные результаты исследования влияния плавающей тонкой упругой пластины на процесс регуляризации разрушающихся стоячих гравитационных поверхностных волн.

*Показано, что использование плавающей пластины существенно меняет динамику волновой моды – регуляризация волн наблюдается при полном подавлении разрушающих механизмов. Плавающая пластина увеличивает предельную крутизну стоячей регулярной волны до величины 0.4 без изменения собственной частоты волны. Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А20-120011690131-7.*

#### **Литература / References:**

1. Базилевский А.В., Калининченко В.А., Рожков А.Н. Вязкая регуляризация разрушающихся волн Фарадея // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107 (11). С. 716–721.
2. Базилевский А.В., Калининченко В.А., Рожков А.Н. Влияние вязкости жидкости на поверхностные волны Фарадея // Изв. РАН. МЖГ. 2018. Т. 6. С. 30–42.
3. Калининченко В.А. Регуляризация гравитационных баротропных волн в двухслойной жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 2019. Т. 6. С. 1–13.
4. Калининченко В.А. Подавление интенсивных колебаний жидкости слоем плавающих частиц // Изв. РАН. МЖГ. 2020. Т. 6. С. 1–13.



## **ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ТРИЗ**

**В.И. Карев**

*Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва, wikarev@ipmnet.ru*

Несмотря на интенсивное развитие энергетики, основанной на нетрадиционных способах с использованием энергии солнечного света, ветра, биотоплива, углеводородное сырье остается пока основным источником энергии на планете. Для России вопросы добычи и переработки нефти и газа особенно актуальны, поскольку отрасль является локомотивом научно-технического развития страны и основным источником золотовалютных запасов.

Вследствие преимущественной отработки легкоизвлекаемых запасов: крупных и доступных месторождений - доля трудноизвлекаемых запасов в структуре запасов нефти и газа во всему мире и РФ растет. Трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ) нефти и газа (Hard-to-recover reserves) - запасы месторождений, отличающиеся сравнительно неблагоприятными для извлечения геологическими условиями залегания и (или) их физическими свойствами.

Из общих балансовых запасов нефти категории  $A+B+C_1$ , которые в России превышают 18 млрд т, к категории ТРИЗ можно отнести около 12 млрд т или 66%. Минэнерго РФ планирует рост доли ТРИЗ нефти в общем объеме нефтедобычи к 2035 г с 8% до 17% [1]. Согласно Стратегии развития минерально-сырьевой базы России до 2035 г, нетрадиционные запасы углеводородов станут основным источником прироста запасов в России [2]. Сейчас уже никто не говорит о том, что нефть через 50 лет кончится, в том числе благодаря Баженовской свите и ачимовским отложениям.

К ТРИЗ относятся запасы нефти [3]:

заключенные в сложных коллекторах с низким коэффициентом извлечения (менее 0,05 мкм<sup>2</sup>), в том числе нефти и газа в доломитах, плотных песчаниках, глинистых сланцах, меловых породах, баженигах;

в зонах контакта нефть-вода (водонефтяных зонах) или нефтегазовых залежах в

зоне контакта нефть-газ (газонефтяных зонах);

содержащие высоковязкую нефть;

характеризующиеся высокой газонасыщенностью и извлечение которых ограничено предельно допустимой величиной депрессии, не вызывающей необратимую деформацию горной породы;

в составе которых присутствуют агрессивные компоненты (сероводород, углекислота);

залегающие на больших глубинах (более 4000 м);

с пластовой температурой 1000°C и выше;

с низкой разницей между пластовой температурой и температурой застывания парафина и смол;

запасы подгазовых частей тонких (до 3 метров) нефтяных оторочек и запасы периферийных частей залежей;

нетрадиционные запасы: сверхтяжелая нефть, битуминозные пески, керогеновая нефть, нефть горючих сланцев.

Наибольший объем ТриЗ - более трети сосредоточен в низкопроницаемых коллекторах. К низкопроницаемым залежам, согласно главе 26 части 2 Налогового кодекса РФ, относятся залежи нефти с проницаемостью менее 2 мД. К ТриЗам относят неохваченные разработкой низкопроницаемые залежи тюменской свиты Западной Сибири. Используемые сегодня технологии вскрытия пластов тюменской свиты (в основном это вертикально-направленные скважины с большеобъемным ГРП) дают низкие результаты продуктивности скважин, характеризуются высокими темпами падения дебитов (в среднем 60% и более в первый год, что связано с падением пластового давления, вследствие чего происходит разгазирование нефти в пласте) и, как следствие, низкими показателями КИН [4]. Эффективность ГРП в вертикальных скважинах невелика из-за особенностей строения и распространения пластов. Одним из вариантов разработки залежей тюменской свиты является технология бурения горизонтальных скважин с многостадийным ГРП (МГРП), широко применяемая в США и Канаде. Однако эта технология также как и большеобъемный ГРП требует расходования больших объемов энергетических и материальных ресурсов: воды проппанта, а также химреагентов, которые к тому наносят значительный экологический ущерб окружающей среде.

К ТриЗам в основном приурочены ачимовские отложения, низкопроницаемые залежи нижнего мела и юрские отложения. Глубина залегания около 3500–4000 м и с точки зрения применяемых технологий они являются наиболее сложными. Мощность ачимовских отложений составляет от 10 до 170 м. Коллектор терригенного типа, залежи часто представляют собой «слоеный пирог» из маломощных нефтенасыщенных, водонасыщенных и глинистых интервалов с аномально высокими пластовыми давлениями. Это требует использования специальных технологий разработки, таких как строительство горизонтальных скважин, и применения высокотехнологичных геолого-технических мероприятий, в числе которых можно назвать: ГРП, физико-химическая обработка призабойной зоны, дострел и перестрел интервалов, термогазохимическое воздействие, изоляционные работы и потокоотклоняющие технологии, а также их комплексное применение.

Лаборатория геомеханики Института проблем механики Российской академии наук в течение многих лет занимается вопросами создания научных основ эффективных низкокзатратных технологий добычи нефти и газа, основанных на геомеханическом подходе. Эти исследования были инициированы создателем лаборатории выдающимся русским ученым-механиком, академиком Сергеем Алексеевичем Христиановичем. Под

его руководством был разработан способ повышения продуктивности нефтяных скважин - метод георыхления, который на практике доказал свою эффективность [5]. В дальнейшем идеи, заложенные в этой технологии были развиты, расширены, применены к газовым и газоконденсатным месторождениям, к подземным хранилищам газа. Был разработан метод направленной разгрузки пласта, который основан на управлении напряжениями в окрестности скважины с целью повышения проницаемости призабойной зоны скважины или недопущения ее необратимого ухудшения [6]. Особую значимость метод направленной разгрузки приобретает для разработки месторождений с низкопроницаемыми коллекторами. Его эффективность и низкая себестоимость обусловлена использованием для достижения эффекта огромного запаса упругой энергии, сосредоточенной в массиве горных пород в результате действия горного давления и давления пластового флюида.

Уровень и распределение напряжений, необходимые для повышения проницаемости в породах, слагающих продуктивный пласт конкретной залежи определяются путем испытаний образцов породы на установке истинно трехосного нагружения [7] и проведения соответствующих расчетов. На рис. 1 показаны результаты одного из испытаний породы Уренгойского газоконденсатного месторождения из скважины, пробуренной на ачимовские отложения. Проводилось моделирование реальных условий в окрестности открытого ствола скважины при уменьшении давления в скважине. На рис. 1а представлены программа нагружения и изменение проницаемости входе испытания, на рис. 1б - кривые деформирования. Видно, что при достижении величины депрессии и соответствующими напряжениями определенного уровня порода начинает интенсивно неупруго деформироваться - "ползти", что приводит к ее растрескиванию и значительному увеличению проницаемости.

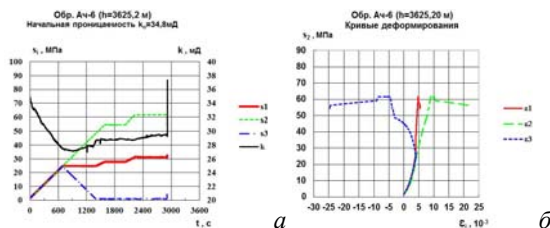


Рисунок 1. Скачкообразный рост проницаемости по достижении напряжениями определенного уровня при моделировании увеличения депрессии в открытом стволе скважины.

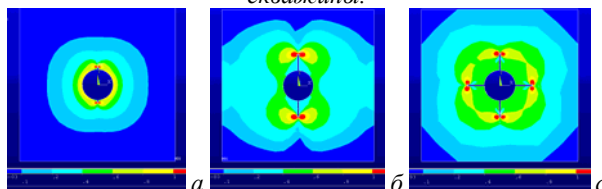


Рисунок 2. Распределение интенсивности касательных напряжений в окрестности необсаженного участка ствола скважины с различным количеством щелей различной глубины для условий Нижнечутинского месторождения.

Еще один пример управления напряжениями в окрестности скважины с целью недопущения падения проницаемости породы. Этот способ может применяться в глинистых интервалах ачимовских отложений. Такие породы уже при небольших

касательных напряжениях начинают ползти, что сопровождается необратимым падением проницаемости. Причем растрескивания глины не происходит, породы деформируется как пластилин. Таким образом при создании депрессии на забое скважины, необходимой для вызова притока, вокруг ее стенок образуется непроницаемая "пробка". Чтобы избежать этого, необходимо не допустить роста касательных напряжений в окрестности скважины при уменьшении в ней давления. Для этого в стенках скважины по всей мощности глинистого интервала необходимо нарезать щели, ориентированные вдоль оси скважины. Испытания породы и расчеты показывают сколько щелей и на какую глубину целесообразно нарезать, рис. 2. Желтым и красным цветом показаны области, в которых при создании эксплуатационной депрессии касательные напряжения достигают величины, при которой по данным испытаний проницаемость необратимо падает практически до нуля. На рис. 2б две щели глубиной, равной радиусу скважины, обеспечивают сохранение проницаемости вокруг скважины. На рис. 2, а и с создание депрессии приводит к образованию вокруг скважины замкнутой непроницаемой зоны.

Таким образом геомеханический подход обеспечивает эффективное экономичное и экологически чистое решение проблем разработки низкопроницаемых залежей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, проект № 2020-1902-01-258 и частичной поддержке РФФИ, проект № 17-41-590148.*

#### **Литература / References:**

1. <https://neftegaz.ru/tech-library/ngk/147767-trudnoizvlekaemye-zapasy-nefti-triz/>
2. «Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года». Утв. Распоряж. Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р.
3. «Временная классификация запасов месторождений, перспективных и прогнозных ресурсов нефти и горючих газов». Приказ МПР РФ от 07.02.2001 №126.
4. Клубков С.В. Стимулирование разработки ТриЗ поможет поддержать уровень добычи нефти в России // Oil & Gas J. 2015. № 7. С. 6–11.
5. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90–94.
6. Karev V.I., Kovalenko Yu.F. Well stimulation on the basis of preliminary triaxial tests of reservoir rock. Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment // Proc. EUROCK 2013. The ISRM Int. Symp. Leiden, CRC Press/Balkema, 2013. pp. 935–940.
7. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Equipment for studying deformation and strength properties of rocks in triaxial loading. Geomechanics of oil and gas wells // Ser. "Advances in Oil and Gas Exploration and Production". Springer, 2020. pp. 61–70.



---

## **ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ЭНЕРГОНЕСУЩИХ МАНТИЙНЫХ ВИХРЕЙ НА ПОТЕПЛЕНИЕ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ – ГИПОТЕЗА**

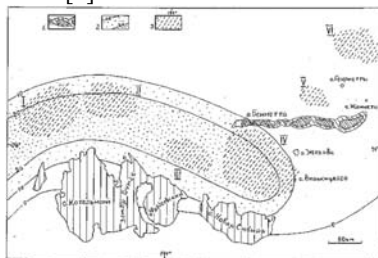
***С.Ю. Касьянов***

*Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова, Москва,  
skas53@yandex.ru*

В Арктической зоне Российской Федерации наблюдаются области интенсивного выделения метана из газогидратов на шельфе и области повышенных потоков тепла из литосферы в океан и вечную мерзлоту, где происходят интенсивные изменения рельефа и длительное время присутствуют обширные площади, на которых лед отсутствует или имеет аномально малую толщину. Мы рассматриваем гипотезу о том, что причиной повышенных потоков эндогенного тепла в Арктической зоне является выделение тепла

из интенсивных горячих мантийных вихрей, влияющее на потепление в Арктике.

Новосибирские острова с севера охватываются дугой зоны повышенного потока тепла к поверхности океана от нижележащих слоев воды (см. рис.1) [1]. На востоке её – зона базальтового вулканизма вокруг острова Беннетта, в которой происходит быстрое изменение рельефа дна, с которым могло быть связано появление и исчезновение различных «земель Санникова» [1].



*Рисунок 1. Поток тепла к поверхности океана от нижележащих слоев воды, газовый шлейф 18.02.1983 г. от подводного источника у о. Беннетта, места наблюдений «Земли Санникова» и других аномальных явлений по разным данным: I – газовый шлейф; 2 – зона повышенного потока тепла к поверхности океана от нижележащих слоев воды и его изолинии в ккал/(см<sup>2</sup>·мес), практически совпадающая с положением Великой Сибирской полыньи; 3 – приблизительное положение аномальных объектов, виденных разными наблюдателями: I – Я. Санниковым, II – Э. Толлем, III – Я. Санниковым, а также Д. Шнаро и А. Шумиловым, IV – Я. Санниковым, V – Google Earth, Data SIO, NOAA, US Navy, NGA, GEBCO (протягиваясь будто от газовой струи льдина), VI – Л. Мухановым. Цитировано по [1].*

У о. Беннетта наблюдаются газовые шлейфы от интенсивных подводных источников газа [1, 2]. Здесь «мощная флюидно-магматическая система формирует ... купольно-кольцевую структуру, центр которой характеризуется наличием повышенного теплового потока с вероятным образованием ареальной вулканической области и реальным воздействием на тепловой баланс океана в районе Великой Сибирской полыньи» [1, С.10]. «Великая Сибирская полынья представляет собой непрерывную полосу открытой воды и молодых льдов, регулярно образующихся за внешней кромкой припая на участке от о-ва Большой Бегичев в море Лаптевых до Медвежьих о-вов в Восточно-Сибирском море» [3]. Существование её связывают как с особенностями гидродинамики морских течений и атмосферной циркуляции или влиянием тепла Северо-Атлантического течения, так и с метановыми флюидами и современным вулканизмом [3]. Эндогенные причины образования Великой Сибирской полыньи (ВСП) представляются предпочтительными, поскольку над областями более теплых вод на поверхности океана, формирующимися под действием эндогенного тепла Земли, создаются области низкого атмосферного давления, объясняющие происхождение сильных ветров в этой области. Периодичность появления шлейфов у о. Беннетта, как и периодичность извержений вулканов, связана с изменениями угловой скорости вращения Земли [1, С.21], которые управляются аномалиями гравитации от планет Солнечной системы [4]. На западе дуги зоны повышенного потока тепла, в море Лаптевых, к 1930-1960 годам исчезли мерзлотные о-ва Васильевский и Семёновский, а к 2013 году образовался новый песчаный о. Яя. На шельфе морей Восточно-Сибирского и Лаптевых происходит интенсивная эмиссия метана [5] и в водной толще наблюдаются газовые факелы метана, выходящего из донных отложений [2]. Для

газификации столь сильных потоков метана из газогидратов необходим значительный поток тепла из литосферы. Области высокой концентрации растворенного метана [5] согласуются с расположением зон высокого потока тепла на рис. 1 и с расположением ВСП. Зона пониженного давления, формирующаяся над ВСП вследствие интенсивных потоков тепла из океана в атмосферу (с поверхности незамерзающей чистой воды или через тонкий молодой лед), оказывает существенное влияние на атмосферную циркуляцию и климат не только непосредственно Арктики, но и глобальный.

Таким образом, можно говорить о том, что существование ВСП связано с существованием дуги повышенного тепловыделения из литосферы и мантии, существование которой, в свою очередь, определяется тремя основными явлениями [1]. Во-первых, базальтовым вулканизмом островов Вилькицкого, Жохова, Беннетта и выходами метана вокруг о. Беннетта – на востоке, и таянием вечно мерзлотных островов и образованием песчаного острова Яя – на западе. Во-вторых, активным выделением метана из газогидратов, область которого охватывает Новосибирские острова, о. Беннетта и шельф моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Во-третьих, высокой сейсмичностью этого района. При этом временной ход извержений газовых шлейфов, как и временной ход извержений вулканов [4], связан с изменениями угловой скорости вращения Земли.

Совокупность всех указанных выше фактов и явлений единообразно объясняется на основе предложенной нами модели трех энергонесущих горячих двухфазных вихрей в мантии Земли [6]: вихрь (1) **Гималаи+Тянь-Шань – Колыма**, вихрь (2) **Колыма – Йеллоустоун** и вихрь (3) **Йеллоустоун – Гудзонов залив – восточная часть Средиземного моря**. В Колымском узле вихри 1 и 2 соприкасаются. Проекция границы вихря 1 на дневную поверхность охватывает Новосибирские о-ва с севера, а проекция границы вихря 2 проходит под шельфом моря Лаптевых. При подъеме вещества на восходящих ветвях вихрей 1 и 2 происходит испарение наиболее легкокипящей фракции –  $\text{SiO}_2$  из вещества вихрей. Образующиеся пары могут достигать литосферы и океана, где конденсируясь, могут формировать интенсивные источники тепла из мантии, в том числе базальтовые и грязевые вулканы на суше и под водой, и могут образовывать новые острова типа о. Яя. Таким образом, мы описали процесс, в котором энергия от системы интенсивных двухфазных мантийных вихрей может переноситься испаряющимся на восходящих ветвях вихрей диоксидом кремния и передаваться водам морей Восточной Арктики и далее всему Мировому океану.

Динамика системы трех энергонесущих вихрей в мантии Земли [6], как и вулканическая деятельность [4], управляется астрономическими факторами. Гравитационные аномалии планет в Солнечной системе, смещая внутреннее ядро Земли [4], изменяют положения эквипотенциальных поверхностей, в том числе границы жидкого внешнего ядра и мантии Земли. При этом вещество жидкого ядра может втекать в область вихря 1, возбуждая процесс перераспределения массы и энергии в системе вихрей [6]. Выделение тепла в мантийных вихрях приводит к тепловому расширению вещества, изменению объема Земли и неоднородному расширению мантии, приводящему к землетрясениям и извержениям вулканов и выбросам газовых шлейфов в Арктике.

Гравитационные аномалии при схождениях Юпитера и Сатурна определяют квазিশестидесятилетний цикл североатлантической мультидекадной осцилляции (АМО) [7]. Индекс АМО резко переходит из «холодной» фазы к «теплой» именно во время скачка геофизических параметров 1997-1998 года, по данным которого были вычислены параметры модели трех вихрей [6]. Следовательно, параметры модели вычислены по данным, непосредственно связанным с квазিশестидесятилетним циклом

АМО. Модель описывает механизм передачи энергии от общепланетарного процесса к морской воде. Поэтому есть основания утверждать, что тепловыделение из системы интенсивных двухфазных мантийных вихрей определяет в том числе и существование квазишестидесятилетнего цикла АМО.

**Выводы.** Поступление тепла из двухфазных интенсивных мантийных вихрей в моря российской Арктики может служить не только причиной проявления квазишестидесятилетнего цикла АМО, но и причиной регионального потепления в Арктике, распространяющегося затем на Мировой океан. Это явление управляется гравитационными аномалиями от планет Солнечной системы со свойственными ей ритмами и может вносить существенный вклад в глобальное потепление, которое, по [7], также имеет связь с гравитационными аномалиями. Энергия мантийных вихрей, в частности, может поддерживать существование Великой Сибирской польницы. Понижение давления над более теплыми водами в Великой Сибирской польнице меняет атмосферную циркуляцию и ослабляет действие тепловой машины первого рода по В.В. Шулейкину.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00466.*

### **Литература / References:**

1. Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Петрова В.В., Слёзин Ю.Б., Флёров Г.Б., Шувалов Р.А., Кузьмин Ю.Д., Овсянников А.А. Современная активность эндогенных процессов у острова Беннетта (архипелаг Де Лонга, Арктика). М.: ИФЗ РАН, 2012. 160 с.
2. Бондур В.Г., Кузнецова Т.В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Иссл. Земли из космоса. 2015. №4. С. 30–43.
3. Бондур В.Г., Кузнецова Т.В., Воробьев В.Е., Замшин В.В. Выявление газопроявлений на шельфе России по данным космической съемки // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2014. Вып. 1 (9). С. 1–23. [http://oilgasjournal.ru/vol\\_9/bondur.html](http://oilgasjournal.ru/vol_9/bondur.html)
4. Баркин Ю.В. Геофизические следствия относительных смещений и колебаний ядра и мантии Земли // ОМТС 2014 г. М.: ИФЗ, 2014. [http://www.ifz.ru/fileadmin/user\\_upload/subdivisions/506/OMTS/2014/16.09/Barkin\\_16\\_09\\_14.pdf](http://www.ifz.ru/fileadmin/user_upload/subdivisions/506/OMTS/2014/16.09/Barkin_16_09_14.pdf)
5. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. 05 Mar 2010. V. 327 (5970). pp. 1246–1250. DOI 10.1126/science.1182221
6. Касьянов С.Ю., Самсонов В.А. О современной системе трех энергонесущих вихрей в мантии Земли // Сб. матер. 5-й Межд. Научн. Конф.-Шк. Мол. Уч. «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах». М.: ИПМех РАН, 2019. С. 77–79.
7. Федоров В.М. Североатлантическая осцилляция и КМО <http://www.solar-climate.com/geo/amo.htm>



---

## **О КАЧЕСТВЕННОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА ПОД ГИМАЛАЙСКО-ТЯНЬ-ШАНЬСКИМ ГОРНЫМ КОЛЬЦОМ**

**С.Ю. Касьянов**

*Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова, Москва,  
skas53@yandex.ru*

Согласно выдвинутой в [1] гипотезе, в 3 тысячелетии до н.э. произошло падение ранее захваченного временного спутника Земли. Орбитальное движение спутника привело к плавлению современного слоя астеносферы, а его падение вызвало образование в мантии вихревого кольца (вихревого тора), распад которого под действием вращения Земли завершился образованием современной системы

интенсивных вихрей в мантии. Согласно развитию этой гипотезы [2], в современной системе интенсивных вихрей в мантии выделяются три связанных между собой энергонесущих вихря: (1) **Гималаи+Тянь-Шань – Кольма (ГТШ-К)**, (2) **Кольма – Йеллоустоун (К-Й)** и (3) **Йеллоустоун – Гудзонов залив – восточная часть Средиземного моря (Й-ГЗ-СМ)**. Движущееся в вихрях вещество находится в частично жидком, частично газообразном состоянии. Это вещество, частично включающее в себя вещество вторгшегося в мантию временного спутника Земли, преимущественно состоит из вещества мантии и содержит значительные количества  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [2].

Движение в вихре **1 (ГТШ-К, то есть Гималаи+Тянь-Шань – Кольма)** направлено по часовой стрелке, если смотреть с юга. Предполагаемый центр выхода вихря **ГТШ-К** расположен на глубине около 1200 км в точке  $39.8^\circ\text{N } 88.7^\circ\text{E}$ , радиус выхода вихря около 1300 км в мантии или около 1600 км по поверхности. Вещество вихря движется в наклонной плоскости при больших перепадах глубины и гидростатического давления. Данные об изменениях геофизических параметров во время их скачка 1997-1998 г. при гравитационном резонансе в Солнечной системе позволили оценить максимальную скорость в вихре 1 как 4131 м/с [2].

Рассмотрим гипотезу о том, что рельеф внутри Гималайско-Тянь-Шаньского кольца связан с гидродинамическим давлением в расположенном под ним внутримантийном интенсивном вихре. Рельеф литосферы внутри Гималайско-Тянь-Шаньского кольца содержит резкие перепады высот от 5000 м в Тибете до 1300 м в пустыне Такла-Макан (рис.1). Рассмотрим стационарное движение односкоростной сжимаемой весомой сплошной среды по плоским круговым линиям тока, лежащим в плоскости, наклонно расположенной в мантии. Исследуем одномерное движение вдоль линии тока радиуса  $R = 557$  км в мантии при заданной плотности  $\rho_0$  в нижней точке траектории и постоянной вдоль траектории величине  $Q = V\rho$ . Центр круговой линии тока лежит на глубине 1200 км. Нормаль к плоскости линии тока образует угол около  $62^\circ$  с вертикалью и лежит в меридиональной плоскости. Будем решать диагностическую одномерную стационарную задачу определения плотности движущейся среды по заданному распределению давления вдоль линии тока. В качестве давления на линии тока приближенно используем гидростатическое давление в мантии в точке прохождения траектории, которое создаётся слоем невозмущенной сферической мантии (используются значения давления по модели PREM [3]) и возвышениями рельефа дневной поверхности вдоль белой окружности радиусом 686 км на рис. 1. Рассматриваемая траектория на наклонной плоскости в мантии, проекцией которой на земную сферу является окружность на карте на рис. 1, в действительности отличается от окружности, но это отличие непринципиально для динамики одномерного движения вдоль траектории. Используя постоянство величины  $Q = V\rho$ , заменим в уравнении одномерного движения скорость через плотность и получим для плотности нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка с начальным условием  $\rho_0$  в нижней точке траектории. Рассматриваемая нами траектория лежит во внутренней части вихря 1 (см.рис.1). Исходя из предположения о твердотельном движении в ядре вихря с максимальной скоростью 4131 м/с [2], достигаемой на окружности радиусом 1300 км (по карте поверхности литосферы), для задания постоянной величины  $Q = V\rho = V_0\rho_0$  вдоль линии тока, соответствующей белой окружности радиусом 686 км на рис.1, зададим для нижней точки рассматриваемой нами линии тока (см.рис.1) в качестве скорости  $V_0$  величину 2180 м/с, а значение плотности  $\rho_0$  выберем так, чтобы при получаемом в ходе решения распределении плотности масса вещества в единичной трубке тока вдоль траектории равнялась массе замещенного им вещества невозмущенной мантии (с плотностью по модели PREM).



Полученное в результате интегрирования уравнения распределение плотности и соответствующее ему распределение скорости представлены на рис. 2. Примечательна близость получившихся значений плотности на траектории с полученной ранее оценкой плотности в вихре 2 в системе интенсивных современных энергонесущих вихрей, равной  $4600 \text{ кг/м}^3$  [2]. Причины такой близости предстоит исследовать.



Рисунок 1. Рельеф внутри Гималайско-Тянь-Шаньского горного кольца. Внизу показано изменение рельефа дневной поверхности вдоль помеченной белым окружности радиусом 686км. Отсчет расстояния ведется слева направо, от юга, по часовой стрелке. Изображение получено с помощью программы Google.

Особый интерес представляет полученная при интегрировании уравнения для плотности кривая зависимости давления от плотности (см. рис. 3), содержащая кроме ожидаемой восходящей ветви нисходящую ветвь и отдельные участки, где  $dP / d\rho < 0$ , что обычно связывают с абсолютной неустойчивостью движения среды.

Таким образом, построена диагностическая модель, позволяющая оценить плотность, скорость и зависимость давления от плотности вдоль линии тока и, тем самым, получить информацию о состоянии движущегося вещества внутримантийного вихря на основе данных о рельефе литосферы над областью вихря, дающую материал для дальнейших исследований.

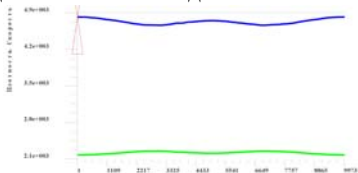


Рисунок 2. Плотность – верхняя кривая и скорость – нижняя кривая в зависимости от азимутального угла вдоль линии тока. Отсчет угла ведется по часовой стрелке, с нулевым значением на юге, т.е. в нижней точке траектории, где плотность наибольшая, а скорость наименьшая.

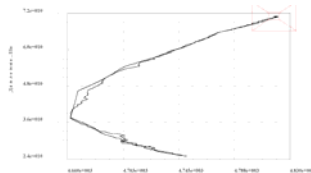


Рисунок 3. Зависимость плотности от гидростатического давления на траектории, полученная по рельефу поверхности литосферы вдоль помеченной белым окружности на рис. 1.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00466

### Литература / References:

1. Касьянов С.Ю. Моделирование орбитального движения крупного астероида при снижении с заглублением в литосферу и мантию Земли // Физические проблемы экологии (экологич. физика).

2012. № 18. С. 151–164.

2. Касьянов С.Ю., Самсонов В.А. О современной системе трех энергонесущих вихрей в мантии Земли // Сб. матер. 5-й Межд. Научн. Конф.-Шк. Мол. Уч. «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах». М.: ИПМех РАН, 2019. С. 77–79.
3. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. V. 25. pp. 297–356.



## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА АНТРОПОГЕННОГО МУСОРА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

**А.В. Килесо<sup>1,2</sup>, О.И. Лобчук<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Балтийский федеральный университет им. И.Канта, Калининград, akiles@kantiana.ru*

<sup>2</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, ioran@atlantic.ocean.ru*

Загрязнение пляжей Калининградской области пластиковым мусором становится крайне актуальной экологической проблемой для региона [1]. Оценка степени загрязнения пляжей Калининградской области, выполненная с помощью метода OSPAR [2], показала высокую степень загрязнения антропогенным мусором. Так, практически 90% от всех обнаруженных образцов мусора на пляжах составил пластик различного размера и происхождения, а встречаемость мусора достигала 0.46 штук на квадратный метр пляжа. Хорошо известно, что ветро-волновое воздействие вносит значительный вклад в перенос и перераспределение мусора в прибрежной зоне моря. Однако до сих пор нет полного понимания характера переноса мусора.

Целью работы стала оценка потенциальных путей переноса в водной среде и мест накопления антропогенного мусора на пляжах Калининградской области при различных метеорологических ситуациях с помощью трехмерного численного моделирования.

Численное моделирование процесса переноса мусора в прибрежной зоне моря выполнен с использованием гидродинамической модели SHYFEM [3]. В данной модели реализована модель ветрового волнения, модель переноса для Эйлера и Лагранжевого подходов.

Модельное пространство представляет собой район юго-восточной Балтики, полностью охватывающий побережье Калининградской области, а также глубоководную часть Гданьской впадины. Для более подробного учета особенностей береговой линии и прибрежного подводного рельефа использовалась неравномерная сетка из треугольных элементов. В прибрежной части сделана более подробная сетка. В качестве батиметрических данных использовались данные эхолотных промеров АОИРАН, а также данные навигационных карт. Для описания вертикальной структуры модельного пространства использовалось 13 z-слоев: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 50, 100 м.

Для выявления потенциальных путей переноса мусора в водной среде при различных метеоусловиях выполнено моделирование следующих ветровых сценариев: ветер скоростью 10 м/с. Направления: северный (0°), северо-западный (315°), западный (270°), юго-западный (225°), южный (180°), юго-восточный (135°), восточный (90°), северо-восточный (45°). Результат численного моделирования позволил оценить потенциальные траектории переноса антропогенного мусора. При характерных ветрах для побережья Калининградской области антропогенный мусор перемещается в восточном направлении вдоль северного побережья Калининградского полуострова и

Куршской косы. Также на пляжах национального парка «Куршская коса» отмечаются потенциальные точки накопления мусора. Данный факт хорошо согласуется с принятой моделью вдольберегового транспорта во время наиболее сильных ветров для северного побережья Калининградского полуострова.

*Исследование проведено при поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области, грант № 19-45-393006 р\_мол\_а.*

#### **Литература / References:**

1. Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П. Особенности распределения микропластика на песчаных пляжах Калининградской области (Балтийское море) // Региональная экология. 2018. Т. 51. № 1. С. 108–121.
2. Лобчук О.И., Есюкова Е.Е., Килесо А.В. Загрязнение пляжей юго-восточной Балтики пластиковым мусором на основе мониторинга по методу OSPAR // Мат. V Всерос. Науч. конф. Мол. Уч. "Комплексные исследования мирового океана". 2020. Калининград: Атлантич. Отд. Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2020. С. 247–248.
3. Umgiesser G., Canu D., Cucco A., Solidoro C. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation // J. Marine Syst. 2004. V. 51 (1–4). pp. 123–145.



---

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПЯТНА УГЛЕВОДОДОВ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*А.В. Кистович, Т.О. Чаплина, Е.В. Степанова*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, [tanu75.06@mail.ru](mailto:tanu75.06@mail.ru)*

Представлены результаты исследования процесса распространения углеводородов с различными физико-химическими свойствами по поверхности воды, а также проведено сравнение аналитических выражений, описывающих установленную форму поверхности углеводородного пятна на воде с наблюдаемыми в экспериментах при различных значениях параметров эксперимента.

Нефть – природная маслянистая горючая жидкость, смесь углеводородов. Физико-химические свойства существенно зависят от состава нефти и могут варьироваться в широких пределах [1, 2]. При попадании на поверхность воды, нефть сразу же начинает претерпевать изменения под воздействием различных физических и химических факторов. Это взаимодействие с окружающей средой можно представить в виде последовательных стадий: растекание, испарение, растворение, эмульгирование, диспергирование, окисление и диспергирование.

Различные процессы протекают в разное время и включают в себя различные фракции нефти – одни происходят с легкими компонентами, другие с более тяжелыми, и состав нефтепродуктов на поверхности изменяется под их воздействием. Растекание и испарение преобладают на часовых временных масштабах, эмульгирование и диспергирование играют наиболее значительную роль на масштабах нескольких дней, а осаждение и биодegradация – на масштабах более недели. Нефть также обладает способностью смачивать твердые частицы, находящиеся в воде, вследствие чего образуются агргаты с отрицательной плавучестью, осаживающиеся на дно [3]. Процесс деградации нефтяного пятна на поверхности воды может занять до нескольких лет.

Растекание нефти на открытой воде происходит под воздействием ветра, поверхностных течений, поверхностного натяжения и сил гравитации, образуя участки, покрытые тонкими масляными пленками. При отсутствии ветра и течений 1м<sup>3</sup> сырой нефти может сформировать пятно радиусом 50 м за 1.5 часа [4].

Физическая модель распространения нефти в отсутствие ветра и течений основана

на учете только поверхностного натяжения и гравитационных сил. В окрестности линии соприкосновения трех сред (вода, нефть, воздух) поверхностное натяжение в  $10^9$  раз превышает гравитационные и инерционные силы, углы наклона на линии соприкосновения сред определяются только действием поверхностного натяжения и неизменны для любых размеров и форм нефтяного пятна.

Для описания формы нефтяного пятна используется квазистатическая модель, основанная на уравнении равновесия контактной линии. Схема линии соприкосновения показана на рис. 1, где  $\sigma_{wa}$ ,  $\sigma_{wo}$ ,  $\sigma_{oa}$  – силы поверхностного натяжения, действующие нормально к линии соприкосновения вдоль граничных поверхностей “вода-воздух”, “вода-нефть” и “нефть-воздух” соответственно.

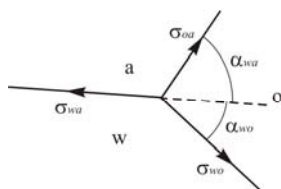


Рисунок 1. Силы поверхностного натяжения на линии соприкосновения трех сред.

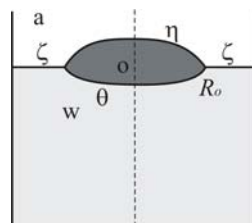


Рисунок 2. Форма пятна углеводородов.

Равновесие линии соприкосновения обеспечивается соотношением

$$\sigma_{wa} + \sigma_{wo} + \sigma_{oa} = 0, \quad (1)$$

записанным с использованием обозначений углов с рис. 1. Соотношение (1) затем разбивается на два уравнения

$$\sigma_{wa} = \sigma_{oa} \cos \alpha_{wa} + \sigma_{wo} \cos \alpha_{wo}, \quad \sigma_{oa} \sin \alpha_{oa} = \sigma_{wo} \sin \alpha_{wo} \quad (2)$$

Предполагаемая форма нефтяного (углеводородного) пятна на поверхности воды представлена на рис. 2, где  $\zeta$ ,  $\eta$ ,  $\theta$  – границы вода-воздух, нефть-воздух и вода-нефть соответственно,  $R_o$  – радиус пятна.

В модели вода и нефть рассматриваются как несжимаемые среды, заключенные в вертикальный цилиндрический контейнер высоты и радиуса, а атмосферное давление постоянно. Давление в воде и масле представляются в виде

$$p_w^{(1)} = p_a + \rho_w g (\zeta - z) + q_w^{(1)}(r, z), \quad \text{при } R_o \leq r \leq R \quad (3)$$

$$p_w^{(2)} = p_a + \rho_o g (\eta - \theta) + \rho_w g (\theta - z) + q_w^{(2)}(r, z), \quad \text{при } 0 \leq r \leq R_o \quad (4)$$

$$p_o = p_a + \rho_o g (\eta - z) + q_o(r, z), \quad \text{при } 0 \leq r \leq R_o \quad (5)$$

Здесь  $q_w^{(1)}(r, z)$ ,  $q_w^{(2)}(r, z)$  и  $q_o(r, z)$  – части полей давления, обусловленные поверхностным натяжением. Формы границ раздела между средами определяются соотношениями

$$S_{wa} : z = \zeta(r), \quad S_{oa} : z = \eta(r), \quad S_{wo} : z = \theta(r) \quad (6)$$

Динамические граничные условия имеют следующую форму

$$p_w^{(1)} - \sigma_{wa} K_{wa} \Big|_{z=\zeta(r)} = p_a, \quad p_o - \sigma_{oa} K_{oa} \Big|_{z=\eta(r)} = p_a, \quad p_w^{(2)} - p_o - \sigma_{wo} K_{wo} \Big|_{z=\theta(r)} = 0, \quad (7)$$

где  $K'_i$  – кривизны межфазных поверхностей, которые определяются формулой (в этом случае  $f$  обозначает одну из соответствующих границ  $\zeta(r)$ ,  $\eta(r)$  или  $\theta(r)$ )

$$K(f) = -\frac{f_{rr}'' + \frac{(1 + f_r'^2)f_r'}{r}}{(1 + f_r'^2)^{3/2}} \quad (8)$$

На линии соприкосновения (при  $r = R_0$ ) условие непрерывности для всех физических полей актуально. В модели испарение не учитывается. За граничными условиями (7) следуют уравнения

$$\begin{aligned} \rho_w g \zeta + \sigma_{wa} K_{wa} \Big|_{z=\zeta(r)} &= a \\ \rho_o g \eta + \sigma_{oa} K_{oa} \Big|_{z=\eta(r)} &= b \\ (\rho_w - \rho_o) g \theta + \sigma_{wo} K_{wo} \Big|_{z=\theta(r)} &= a - b \end{aligned} \quad (9)$$

где  $a$  и  $b$  - некоторые константы. Соотношения (9) описывают “линзу” нефти на поверхности воды, как показано на рис. 2.

Теперь, чтобы получить окончательные результаты, необходимо упомянуть  $F_i$  как безразмерную форму  $i$ -ой поверхности. Реализация ранее отмеченной информации о “плоской” водной поверхности на границе “вода-воздух” позволяет использовать приближение  $|F_\zeta'| \ll 1$ . Полученные оценки  $\max(|F_\eta'|) = \max(|\eta_r'|) = \text{tg } \alpha_{wa} \approx 0.72$  и  $\max(|F_\theta'|) = \max(|\theta_r'|) = \text{tg } \alpha_{wo} \approx 0.42$  позволяют переписать в приближенном виде для всего диапазона вариации  $\xi$  решение, удовлетворяющее условию  $F_\xi'|_{\xi=0} = 0$  (обусловленному цилиндрической симметрией пятна), имеет вид

$$F = AI_0(\xi) + \frac{A^3 \xi^4}{64} \left[ 1 + \frac{5(2 + A^2)\xi^2}{36} + \frac{\left(82 + \frac{677}{4}A^2 + \frac{261}{4}A^4\right)\xi^4}{2304} + \dots \right], \quad (10)$$

где  $I_0$  – модифицированная функция Бесселя.

Чтобы представить в явном виде форму пятна, необходимо найти значения шести параметров  $A_\zeta$ ,  $A_\eta$ ,  $A_\theta$ ,  $R_0$ ,  $a$  и  $b$ , для чего записаны шесть уравнений с шестью неизвестными безразмерными коэффициентами. Численное решение данной задачи получено при реализации встроенных в программное обеспечение наборов функций. Графическое представление решения приведено на рис. 3.

Получены дифференциальные уравнения, определяющие форму “нефтяного тела”, и их решения для квазистационарной формы углеводородного пятна на поверхности воды. Проведено экспериментальное исследование процесса роста площади компактного пятна на поверхности воды при различных физических условиях (температура и соленость воды). На поверхности соленой воды капля нефти растекается медленнее, чем на поверхности пресной воды. Выявлена обусловленность скорости растекания углеводородного пятна начальным объемом, вязкостью и поверхностным натяжением нефти.

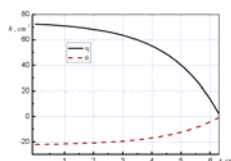


Рисунок 3. Границы нефтяного пятна на поверхности воды.

В последние годы различные государства прилагают большие усилия по совершенствованию систем предупреждения и ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, но эта проблема по-прежнему остается актуальной.

В целях снижения возможных негативных последствий особое внимание необходимо уделить изучению методов локализации, ликвидации разливов нефти и разработке дополнительного комплекса мероприятий по сбору и утилизации попавших во внешнюю среду углеводородов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 "Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России".*

#### **Литература / References:**

1. Дриацкая З.В., Мхчян М.А., Жмыхова Н.М. Нефти СССР. М.: Химия, 1975. 81 с.
2. <https://petrodigest.ru/>
3. Зацева С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Станова В.В. Прогнозирование распространения нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях. М.: АО «Финпол», 2018. 140 с.
4. Гриценко А.И., Аكوпова Г.С., Максимов В.М. Экология. Нефть и газ. М.: Наука, 1997. 597 с.



---

### **О ПРИНЦИПАХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПАЛЕОСТРУКТУР МОРСКОГО ДНА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ (НА ПРИМЕРЕ ГОЛУБОЙ БУХТЫ)**

***М.С. Ключев<sup>1</sup>, А.А. Шрейдер<sup>1</sup>, А.С. Зверев<sup>2</sup>, А.Л. Бреховских<sup>1</sup>, И.Я. Ракитин<sup>1</sup>, Е.Р. Вольтер<sup>3</sup>, А.Э. Сажнева<sup>1</sup>***

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, [mklyuev@mail.ru](mailto:mklyuev@mail.ru)*

<sup>2</sup> *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, [sparker1@yandex.ru](mailto:sparker1@yandex.ru)*

<sup>3</sup> *Институт экологии Академии Наук Абхазии, Сухум, Республика Абхазия, [ervolter@mail.ru](mailto:ervolter@mail.ru)*

Палеоструктуры прибрежной морской зоны являются уникальными объектами морской геологии, которые возникают при затоплении дельт и русел рек вследствие повышения уровня моря или опускания прибрежной суши и дальнейшей их эволюции в морских условиях.

Эти структуры являются своеобразными маркерами колебаний уровня моря, тектонических движений его прибрежной зоны, служат аккумуляторами современных морских и речных осадков, а также ископаемого органического вещества, вследствие чего представляют значительный интерес для различных областей науки – геофизики, геологии, геохимии, гидробиологии и геоэкологии.

В прикладном плане, они могут содержать россыпи ценных рудных ископаемых (золота, платины, серебра, алмазов и т.п.), которые были размывы водными потоками или вынесены с суши, и аккумулярованных в ложе палеорула.

Как показали натурные исследования [1–4], для обнаружения и изучения донных палеоструктур в прибрежной зоне эффективно совместное использование сейсмоакустических средств широкого частотного диапазона  $f$  (200 кГц – 300 Гц) с комбинированными диаграммами направленности  $\theta$  (узкой от 4° и широкой до 180°), а также применение высокоточной GPS навигации.

В качестве таковых применяются:

- высокочастотный узколучевой эхолот ( $f$  ~ сотен килогерц,  $\theta$  ~ порядка единиц градусов), определяющий профиль морского дна;

- высокочастотный узколучевой профилограф ( $f \sim$  десятка кГц,  $\theta \sim$  единиц градусов), определяющий тип и структура верхнего осадочного слоя;
- среднечастотный сейсмоакустический профилограф с электромеханическим излучателем типа «бумер» ( $f \sim$  единиц килогерц,  $\theta \sim$  десятков градусов), определяющий более глубокую донную структуру;
- низкочастотный сейсмоакустический профилограф с электронскровым излучателем типа «спаркер» ( $f \sim$  сотен герц,  $\theta \sim$  десятков градусов), определяющий еще более глубокие донные структуры.

Применение высокоточной GPS навигации позволяет определять детальное пространственное строение палеоструктур и выполнять их подробное картографирование, что повышает достоверность их идентификации и точность определений их параметров.

Ключевым вопросом в обнаружении палеоструктур являются критерии и классификационные признаки их наличия. В результате натурных исследований и аналитической проработки были определены основные критерии и классификационные признаки их наличия [1–4]:

1. Наличие «коробчатого» профиля на батиметрии морского дна и его плавное трансляционное повторение в пространстве.
2. Наличие «коробчатого» профиля, заполненного осадками, на сейсмоакустической структуре морского дна и его плавное трансляционное повторение в пространстве.
3. Наличие изрезанной и расчлененной геоморфологии, не подвергавшейся воздействию водного потока, говорит об отсутствии палеоруслу в данном месте.
4. Соответствие положения палеоруслу современным речным структурам суши – руслу, берегам, долине, каньону, дельте.
5. Возможное наличие палеопритоков и палеodelьт, распознаваемых согласно тем же критериям палеорусла.
6. Наличие газовых факелов, во многих случаях сопутствующих палеоруслу.

Под «коробчатым» профилем здесь понимается профиль в виде чаши с выраженными береговыми склонами и уплощенным дном. Он должен плавно трансляционно повторяться в пространстве, очерчивая канал палеорусла. Эта чаша, как правило, заполнена слабо консолидированными донными осадками с ровной поверхностью, поскольку она является локальным глубинным максимумом и в него сваливается весь осадочный материал. Наличие изрезанной и расчлененной геоморфологии (скальных осадочных пород, мергелевых гребней и т.п.), не подвергавшейся воздействию водного потока, говорит об отсутствии палеорусла в данном месте. Как правило, палеорусло является продолжением современного сухопутного речного русла или ее дельты. В палеорусло могут впадать палеопритоки, образуя места их слияния, а также оно может разделяться на разветления в виде палеodelьт. Палеруслу зачастую сопутствуют газовые факелы, поскольку оно может быть приурочено к геологическим разломам, а заполняющие его осадки менее консолидированы и более прозрачны для выхода донных газов.

Таким образом, принципы обнаружения палеоструктур в прибрежной зоне заключаются в следующем:

1. Использование широкополосного сейсмоакустического зондирования морского дна при комбинированных диаграммах направленности.
  2. Обеспечение высокоточной морской GPS навигации.
  3. Применение критериев и классификационных признаков наличия палеоструктур.
- В качестве иллюстрации этих принципов рассмотрим результаты изучения

палеоструктур реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик. В этих исследованиях использовались комплекс гидроакустического профилирования донной поверхности и верхнего слоя осадков разработки ИО РАН и сейсмоакустический комплекс «Геонт-шельф» производства ООО «Спектр-геофизика» [5–8]. При обработке данных использовались оригинальные методики и алгоритмы совместной обработки информации от различных устройств, которые позволяют существенно улучшать распознавание и идентификацию донных палеоструктур [9–12].

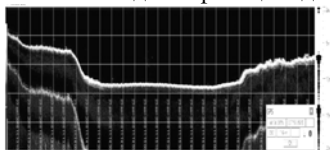


Рисунок 1. Поперечный профиль палеоруслу реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г. Геленджик (эхолот  $f=200$  кГц,  $\theta=4^\circ$ ).

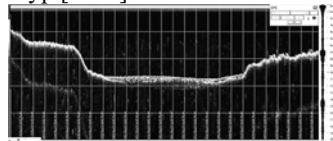


Рисунок 2. Поперечный профиль палеоруслу реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г. Геленджик (параметрический профилограф  $f=20$  кГц,  $\theta=4.5^\circ$ ).

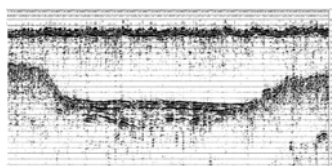


Рисунок 3. Среднечастотный широконаправленный профилограф 1-2 кГц с излучателем типа «бумер».

На рис. 1 представлен поперечный профиль палеоруслу реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик по данным эхолота (частота 200 кГц, диаграмма направленности  $4^\circ$ ). Из рисунка видно, что поперечное сечение палеоруслу имеет «коробчатую» форму шириной около 120 м с крутыми береговыми склонами высотой до 6 м и ровным, по-видимому, осадочным заполнением на глубине около 11 м. Можно предположить, что палеоруслу представляет собой канал, вырезанный древними потоками в скальном осадочном основании, который частично заполнен современными осадками до практически ровной поверхности.

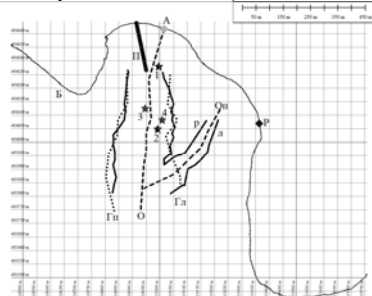
На рис. 2 представлен поперечный профиль палеоруслу реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик по данным высокочастотного параметрического профилографа (частота 20 кГц, диаграмма направленности  $4.5^\circ$ ) в той же точке, что и рис. 1. Из рисунка видно, что зондирующий импульс практически не проникает в береговые склоны палеоруслу, что говорит об их возможном скальном осадочном составе, и проникает на глубину около 1 метра вглубь грунта, заполняющего чашу палеоруслу, что говорит о его возможном неуплотненном осадочном составе. Из рисунка следует, что скальные берега уходят под неуплотненные осадки, заполняющие чашу палеоруслу.

На рис. 3 представлен поперечный профиль палеоруслу реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г.Геленджик по данным среднечастотного профилографа с излучателем типа «бумер» (частота 1–2 кГц, широконаправленный) в той же точке, что и рис.1. Из рисунка видно, что зондирующий импульс по-прежнему практически не проникает в береговые склоны палеоруслу, что дополнительно подтверждает их возможный скальный осадочный состав, и проникает на глубину около 4 метров вглубь заполняющего чашу палеоруслу грунта, что подтверждает его возможный



неуплотненный осадочный состав. На рисунке отчетливо видна форма дна палеоруслу с максимальной глубиной около 4 метров относительно поверхности заполняющих его осадков, которое, по-видимому, складывается скальным осадочным грунтом.

Выявленные палеоструктуры реки Ашамба и сопутствующие им образования в Голубой бухте были подытожены и нанесены на карту в плоских географических координатах, построенную с помощью компьютерной программы Global Mapper в универсальной поперечной проекции Меркатора UTM зона 37 (36 – 42°E северной геосферы, метры север/юг – метры запад/восток) в системе координат WGS84 (рис. 4).



*Рисунок 4. Карта расположения палеоруслу реки Ашамба и ее палеопритока, а также газовые факелы в Голубой бухте: Б – береговая линия, П – причал, А – современное устье реки Ашамба, О – ось палеоруслу реки Ашамба, Гп – правый берег палеоруслу Ашамбы (сплошная линия – профилограф 20 кГц, пунктирная – профилограф 1-2 кГц), Гл – левый берег палеоруслу Ашамбы (сплошная линия – профилограф 20 кГц, пунктирная – профилограф 1-2 кГц), Р – современное устье ручья, Оп – ось палеопритока, р – правый берег палеопритока, л – левый берег палеопритока, звездочки с номерами 1-4 – некоторые газовые факелы.*

Таким образом, разработанные принципы сейсмоакустического обнаружения донных палеоструктур в прибрежной зоне позволяют выявлять, идентифицировать и картографировать их на основе данных, полученных в натуральных морских условиях.

*Данная работа выполнена в рамках темы Государственного задания № 0149-2019-0005 ИО РАН и гранта РФФИ № А 20-05-00089.*

### **Литература / References:**

1. Клюев М.С., Шрейдер А.А., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Зверев А.С., Вольтер Е.Р., Ольховский С.В., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Сажнева А.Э. Палеодолина реки Ашамба в геоморфологии дна Голубой бухты вблизи г.Геленджик по данным параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. конф. «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Пятая международная школа молодых ученых». М.: ИПМех РАН, 2019. С. 81–83.
2. Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Захаров Е.В., Клюев М.С., Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Сажнева А.Э., Мазуркевич А.Н., Ольховский С.В., Шрейдер А.А. Палеоструктуры реки Ашамба в геоморфологии дна Голубой бухты по данным параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. XVI Всерос. Науч.-Тех. Конф. «МСОИ-2019. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 1. С. 144–147.
3. Клюев М.С., Шрейдер А.А., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Зверев А.С., Вольтер Е.Р., Ольховский С.В., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Сажнева А.Э. Метановые факелы Голубой бухты вблизи г.Геленджик по данным параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. конф. «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Пятая международная школа молодых ученых». М.: ИПМех РАН, 2019. С. 83–84.
4. Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Захаров Е.В., Зверев А.С., Клюев М.С.,

- Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Мазуркевич А.Н., Ольховский С.В., Ракигин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А. О газовых сипах Голубой бухты вблизи г.Геленджик по данным параметрического профилографа с использованием спутниковой навигации // Матер. XXIII Междунар. Науч. Конф. (Шк.) по Мор. Геол. "Геология морей и океанов". М.: ИО РАН, 2019. Т. V. С. 77–81.
5. Клюев М.С., Ольховский С.В., Фазлуллин С.М., Сажнева А.Э., Евсенко Е.И., Шрейдер Ал.А. О возможностях системы параметрического профилографа, эхолота и приемника ГЛОНАСС/GPS для комплексных исследований донных антропоценовых осадочных отложений // Матер. XXI Междунар. Науч. Конф. (Шк.) по Мор. Геол. "Геология морей и океанов". М.: ГЕОС, 2015. Т. V. С. 132–136.
  6. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Клюев М.С., Евсенко Е.И. Высокоразрешающая геоакустическая система для геолого-археологического изучения дна // Процессы в геосредах. 2016. № 2. С. 156–161.
  7. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Клюев М.С., Сажнева А.Э., Бреховских А.Л., Ольховский С.В., Захаров Е.В., Чижиков В.В., Евсенко Е.И., Ракигин И.Я., Гринберг О.В. Технологические особенности применения параметрического профилографа для исследования придонного слоя // Процессы в геосредах. 2018. № 4 (18). С. 1249–1252.
  8. Бреховских А.Л., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Клюев М.С., Ольховский С.В., Ракигин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А. Разработка основ технологии исследования объектов культурного наследия, погребенных в донных неуплотненных осадках, методом параметрического профилографа с использованием данных спутниковой навигации // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 2. С. 5–14. DOI 10.29006/2587-9634.JOR-2018.46(2).1
  9. Шрейдер Ал. А., Шрейдер А. А., Галиндо-Залдивар Ж., Клюев М.С., Евсенко Е.И., Ольховский С.В., Сажнева А.Э., Захаров Е.В., Чижиков В.В., Бреховских А.Л., Ракигин И.Я., Гринберг О.В. Первые данные геолого-археологического изучения патрейского шельфа Таманского залива Черного моря // Процессы в геосредах. 2017. № 2. С. 557–562.
  10. Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Захаров Е.В., Клюев М.С., Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Сажнева А.Э., Мазуркевич А.Н., Ольховский С.В., Шрейдер А.А. Об изучении структуры верхнего слоя осадков на озере Сенница методом параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. XVI Всерос. Науч.-Тех. Конф. «МСОИ-2019. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 1. С. 140–143.
  11. Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Захаров Е.В., Зверев А.С., Клюев М.С., Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Мазуркевич А.Н., Ольховский С.В., Ракигин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А. Исследование структуры придонного осадочного слоя на озере Сенница методом параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. XXIII Междунар. Науч. Конф. (Шк.) по Мор. Геол. "Геология морей и океанов". М.: ИО РАН, 2019. Т. V. С. 68–71.
  12. Беликов Р.А., Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Клюев М.С., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А. О возможностях параметрического профилографа со спутниковой навигацией по изучению формы и структуры ихтиологических сообществ // Матер. XVI Всерос. Науч.-Тех. Конф. «МСОИ-2019. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 2. С. 228–231.



## О ПАЛЕОПРИТОКЕ ПАЛЕОРУСЛА РЕКИ АШАМБА В ГОЛУБОЙ БУХТЕ ПО ДАННЫМ ШИРОКОПОЛОСНОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

*М.С. Клюев<sup>1</sup>, А.А. Шрейдер<sup>1</sup>, А.С. Зверев<sup>2</sup>, А.Л. Бреховских<sup>1</sup>, И.Я. Ракигин<sup>1</sup>, Е.Р. Вольтер<sup>3</sup>, А.Э. Сажнева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, mkyuev@mail.ru*

<sup>2</sup> *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, sparker1@yandex.ru*

<sup>3</sup> *Институт экологии Академии Наук Абхазии, Сухум, Республика Абхазия, ervolter@mail.ru*

При сейсмоакустических исследованиях дна Голубой бухты вблизи г. Геленджик в 2018 г. было обнаружено палеорусло реки Ашамба, а также приуроченные к нему

газовые факелы [1–4].

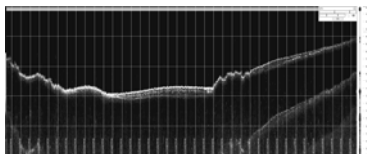
При этом использовался метод широкополосного сейсмоакустического профилирования, заключающийся в совместном использовании сейсмоакустических средств широкого частотного диапазона  $f$  (200 кГц – 300 Гц) с комбинированными диаграммами направленности  $\theta$  (узкой от  $4^\circ$  и широкой до  $180^\circ$ ), а также применение высокоточной GPS навигации [5–8].

Для распознавания и идентификации палеоструктур использовались критерии и классификационные признаки их наличия, а также принципы обнаружения палеоструктур в прибрежной зоне, разработанные в результате обширных натурных исследований и аналитической проработки [1–4].

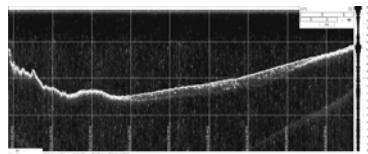
При обработке данных применялись оригинальные методики и алгоритмы совместной обработки информации от различных устройств, которые позволяют существенно улучшать распознавание и идентификацию донных палеоструктур [9–12]. Дальнейшие исследования в 2019 г. позволили выявить палеоприток палеорула реки Ашамба, место его впадения в палеоруло, а также новые газовые факелы.

На рис. 1 представлен поперечный (относительно оси палеорула) профиль дна до слияния палеорул реки Ашамба и притока в Голубой бухте вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа (частота 20 кГц, диаграмма направленности  $4.5^\circ$ ). Отчетливо виден разделительный скальный барьер между палеорулом и палеопритком в центральной части рисунка справа.

На рис. 2 представлен поперечный (относительно оси палеорула) профиль дна после слияния палеорул реки Ашамба и притока в Голубой бухте вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа (частота 20 кГц, диаграмма направленности  $4.5^\circ$ ). Отчетливо видно исчезновение этого разделительного скального барьера и слияние палеорула реки Ашамба и палеопритока в единое палеоруло.



*Рисунок 1. Поперечный профиль до слияния палеорул реки Ашамба и притока в Голубой бухте вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа ( $f=20$  кГц,  $\theta=4.5^\circ$ ).*



*Рисунок 2. Поперечный профиль после слияния палеорул реки Ашамба и притока в Голубой бухте вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа ( $f=20$  кГц,  $\theta=4.5^\circ$ ).*

На рис. 3 представлен поперечный разрез русла палеопритока реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа (частота 20 кГц, диаграмма направленности  $4.5^\circ$ ). Отчетливо видно чашеобразное ложе палеопритока, заполненное неконсолированными донными осадками.

В процессе исследований было также установлено, что прибрежным донным палеоструктурам могут сопутствовать газовые факелы (метановые сипы) [4-5]. Это может быть связано с тем обстоятельством, что палеоструктуры зачастую приурочены к геологическим разломам, а заполняющие их осадки менее консолидированы и более прозрачны для выхода донных газов.

На рис. 4 1-4 (1-2 – выявленные в 2018 году, 3-4 – выявленные в 2019 году) представлены газовые факелы в Голубой бухте в районе палеорула реки Ашамбы (эхолот 200 кГц). Они имеют как струйный (1, 3), так и распределенный (2, 4) характер.

Выявленные палеоструктуры реки Ашамба и сопутствующие им образования в Голубой бухте были подытожены и нанесены на карту в плоских географических координатах, построенную с помощью компьютерной программы Global Mapper в универсальной поперечной проекции Меркатора UTM зона 37 (36°E-42°E северной геосферы, метры север/юг – метры запад/восток) в системе координат WGS84 (Рис. 4).

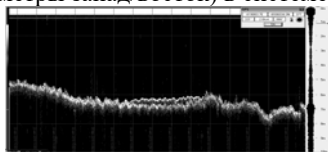


Рисунок 3. Поперечный разрез русла палеопритока реки Ашамба в Голубой бухте вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа ( $f=20$  кГц,  $\theta=4.5^\circ$ ).

Здесь Б – береговая линия, П – причал, А – современное устье реки Ашамба, О – ось палеорула реки Ашамба, Гп – правый берег палеорула Ашамбы (сплошная линия – профилограф 20 кГц, пунктирная – профилограф 1-2 кГц), Гл – левый берег палеорула Ашамбы (сплошная линия – профилограф 20 кГц, пунктирная – профилограф 1-2 кГц), Р – современное устье ручья, Оп – ось палеопритока, р – правый берег палеопритока, л – левый берег палеопритока, звездочки с номерами 1-4 – некоторые газовые факелы (номер соответствует номеру изображения факела на рис. 3).

Таким образом, наличие палеорула и палеопритока реки Ашамба говорит о продолжительном осушении дна Голубой бухты в прошлом, так что потоки воды могли образовать каналы палеорула и палеопритока в осадочной породе. При последующем затоплении они, будучи локальными максимумами глубин, превратились в своеобразные аккумуляторы современных морских осадков и ископаемого органического вещества. Вследствие этого, выявленные палеоструктуры представляют значительный интерес для различных областей современной науки – геофизики, геологии, геохимии, гидробиологии и геоэкологии, а их подробное изучение является актуальной задачей.

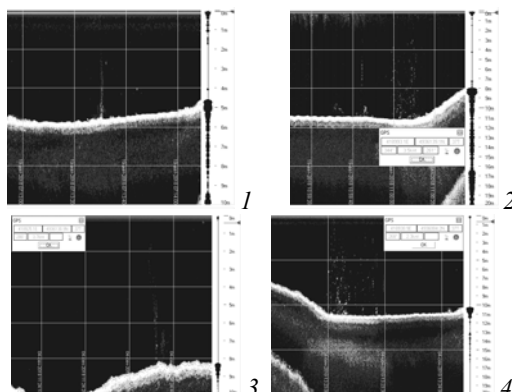


Рисунок 4. Газовые факелы 1-4 в Голубой бухте в районе палеорула реки Ашамбы (эхолот 200 кГц).

Данная работа выполнена в рамках темы Государственного задания № 0149-2019-0005 ИО РАН и гранта РФФИ № А 20-05-00089.

#### Литература / References:

1. Клюев М.С., Шрейдер А.А., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Зверев А.С., Вольтер Е.Р., Ольховский

- С.В., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Сажнева А.Э. Палеодолина реки Ашамба в геоморфологии дна Голубой бухты вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. конф. «Физич. и математич. моделир. процессов в геосредах». М.: ИПМех РАН, 2019. С. 81–83.
2. Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Захаров Е.В., Клоев М.С., Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Сажнева А.Э., Мазуркевич А.Н., Ольховский С.В., Шрейдер А.А. Палеоструктуры реки Ашамба в геоморфологии дна Голубой бухты по данным параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. XVI Всерос. Науч.-Тех. Конф. МСОИ-2019. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 1. С. 144–147.
  3. Клоев М.С., Шрейдер А.А., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Зверев А.С., Вольтер Е.Р., Ольховский С.В., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Сажнева А.Э. Метановые факелы Голубой бухты вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. конф. «Физич. и математич. моделир. процессов в геосредах». М.: ИПМех РАН, 2019. С. 83–84.
  4. Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Захаров Е.В., Зверев А.С., Клоев М.С., Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Мазуркевич А.Н., Ольховский С.В., Ракитин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А. О газовых сипах Голубой бухты вблизи г. Геленджик по данным параметрического профилографа с использованием спутниковой навигации // Матер. XXIII Междунар. Науч. Конф. (Шк.) по Мор. Геол. «Геология морей и океанов». М.: ИО РАН, 2019. Т. V. С. 77–81.
  5. Клоев М.С., Ольховский С.В., Фазлуллин С.М., Сажнева А.Э., Евсенко Е.И., Шрейдер Ал.А. О возможностях системы параметрического профилографа, эхолота и приемника ГЛОНАСС/GPS для комплексных исследований донных антропогенных осадочных отложений // Матер. XXI Междунар. Науч. Конф. (Шк.) по Мор. Геол. «Геология морей и океанов». М.: ГЕОС, 2015. Т. V. С. 132–136.
  6. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Клоев М.С., Евсенко Е.И. Высокорастворяющая геоакустическая система для геолого-археологического изучения дна // Процессы в геосредах. 2016. № 2. С. 156–161.
  7. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Клоев М.С., Сажнева А.Э., Бреховских А.Л., Ольховский С.В., Захаров Е.В., Чижиков В.В., Евсенко Е.И., Ракитин И.Я., Гринберг О.В. Технологические особенности применения параметрического профилографа для исследования придонного слоя // Процессы в геосредах. 2018. № 4 (18). С. 1249–1252.
  8. Бреховских А.Л., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Клоев М.С., Ольховский С.В., Ракитин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А. Разработка основ технологии исследования объектов культурного наследия, погребенных в донных неуплотненных осадках, методом параметрического профилографа с использованием данных спутниковой навигации // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 2. С. 5–14. DOI 10.29006/2587-9634.JOR-2018.46(2).1
  9. Шрейдер Ал. А., Шрейдер А. А., Галиндо-Залдивар Ж., Клоев М.С., Евсенко Е.И., Ольховский С.В., Сажнева А.Э., Захаров Е.В., Чижиков В.В., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Гринберг О.В. Первые данные геолого-археологического изучения патрейского шельфа Таманского залива Черного моря // Процессы в геосредах. 2017. № 2. С. 557–562.
  10. Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Захаров Е.В., Клоев М.С., Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Сажнева А.Э., Мазуркевич А.Н., Ольховский С.В., Шрейдер А.А. Об изучении структуры верхнего слоя осадков на озере Сенница методом параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. XVI Всерос. Науч.-Тех. Конф. «МСОИ-2019. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 1. С. 140–143.
  11. Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Захаров Е.В., Зверев А.С., Клоев М.С., Косьян Р.Д., Куклев С.Б., Мазуркевич А.Н., Ольховский С.В., Ракитин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А. Исследование структуры придонного осадочного слоя на озере Сенница методом параметрического профилографа со спутниковой навигацией // Матер. XXIII Междунар. Науч. Конф. (Шк.) по Мор. Геол. «Геология морей и океанов». М.: ИО РАН, 2019. Т. V. С. 68–71.
  12. Беликов Р.А., Бреховских А.Л., Вольтер Е.Р., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Клоев М.С., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А. О возможностях параметрического профилографа со спутниковой навигацией по изучению формы и структуры иктиологических сообществ // Матер. XVI Всерос. Науч.-Тех. Конф. «МСОИ-2019. М.: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 2. С. 228–231.



## ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА

*Ю.Ф. Коваленко*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва,  
perfolinkgeo@yandex.ru*

Одной из основных проблем при эксплуатации скважин подземных хранилищ газа (ПХГ) являются явления, связанные с выносом песка из скважин [1, 2]. К ним относятся:

- пескопроявление – поступление песка в скважину при дренировании слабоустойчивых пород. Пескопроявление может наблюдаться в течение всего срока эксплуатации скважины, т.е. десятки лет.

- разрушение призабойной зоны пласта и образование песчаных пробок – это интенсивный вынос в скважину песка с разрушением скелета породы, образованием каверн, каналов различных геометрических форм и размеров. Гранулометрический состав выносимого при этом песка идентичен составу по керну. В результате выноса песка нижняя часть скважины до какой-то высоты заполняется песком. Скважина сначала уменьшает дебит, а затем совсем перестает давать газ, так как забита песком и мелкими частицами породы.

В литературе за основную причину выноса песка в скважину принимают разрушение призабойной зоны пласта (ПЗП), которое является следствием возникновения напряжений в породе, превышающих предел прочности горной породы [3-5]. В связи с этим, одним из основных направлений предупреждения разрушения ПЗП является снижение депрессии на пласт путем уменьшения дебита скважины. В настоящее время при эксплуатации ПХГ на скважинах создаются весьма малые рабочие депрессии и репрессии, обычно не превышающие 0,5–1 МПа. Тем не менее, даже при столь малых значениях депрессий/репрессий при циклическом изменении пластового давления в коллекторе ПХГ в скважинах наблюдаются явления пескопроявления. С учетом того, что малые депрессии/репрессии не вызывают заметных изменений напряжений в ПЗП, такое может происходить только при очень низких значениях прочности пород-коллекторов. В то же время выполненные на установке ИСТНН [6] исследования прочностных свойств пород-коллекторов из Кущевского, Касимовского, Увязовского и Карашурского ПХГ показали, что их прочностные характеристики (модуль сцепления  $C=8$  МПа и угол внутреннего трения  $\rho=25^0$ ) не настолько малы, чтобы создаваемые в скважинах ПХГ депрессии/репрессии могут быть причиной разрушения стенок скважин и выноса песка из них.

Это получило подтверждение в опытах на установке ИСТНН по физическому моделированию деформационных и фильтрационных процессов в ПЗП под действием депрессий и репрессий при отборе и закачке газа. Опыты проводились на кубических образцах породы из коллекторов четырех указанных выше ПХГ. В опытах моделировалось циклическое создание в скважине депрессий и репрессий в 1 и 2 МПа. После создания в образцах напряжений, отвечающих указанным депрессиям и репрессиям, осуществлялась выдержка образцов под данным напряжением для измерения ползучести породы. Этим моделировались периоды хранения газа в ПХГ. В ходе экспериментов измерялись деформации образцов в трех направлениях, а также изменение проницаемости образца в одном из направлений. Практически во всех опытах разрушения образцов не происходило. Таким образом, следует предположить, что имеется другой фактор, приводящий к возникновению на стенках скважин

напряжений, достаточных для инициации разрушения породы.

Анализ механического поведения пород коллектора ПХГ, выполненный на основе геомеханического подхода, показал, что таким фактором может быть вызываемое изменением порового давления в пласте ПХГ изменение исходного напряженного состояния в глубине пласта. В результате исходное напряженное состояние в пласте, предполагаемое изначально равномерным сжатием, становится неравнокомпонентным – эффективные вертикальные и горизонтальные напряжения от горного будут различны:

$$\tilde{s}_3 = \tilde{s}_3^0 + (1 - \delta) \Delta p_{nl}(t), \tilde{s}_1 = \tilde{s}_1^0 + \frac{\nu}{1 - \nu} (1 - \delta) \Delta p_{nl}(t), \tilde{s}_2 = \tilde{s}_2^0 + \frac{\nu}{1 - \nu} (1 - \delta) \Delta p_{nl}(t) \quad (1)$$

Здесь выбрана декартова система координат, в которой ось 3 направлена по вертикали (т.е. ортогонально плоскости напластования), а оси 1 и 2 лежат в горизонтальной плоскости (плоскости напластования);  $\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \tilde{s}_3$  – текущие эффективные напряжения от горного давления в пласте  $\tilde{s}_i = q + p_0(1 - \delta)$  [7],  $\tilde{s}_1^0, \tilde{s}_2^0, \tilde{s}_3^0$  – начальные эффективные (действующие в грунтовом скелете) напряжения от горного давления в пласте;  $q$  – исходное равнокомпонентное сжимающее напряжение от горного давления (при глубине залегания  $H$  горное давление  $q = -\gamma H$ , где  $\gamma$  – удельный вес вышележащих пород. Обычно полагают  $\gamma = 2.3 \cdot 10^3$  кГ/м<sup>3</sup>),  $\tilde{s}_i, q < 0, p_0 > 0$ ;  $\Delta p_{nl}(t)$  – изменение пластового давления;  $\nu$  – коэффициент Пуассона породы пласта;  $\delta$  – доля площадок контактов относительно всей поверхности зерна грунтового скелета. Обычно полагают для осадочных горных пород  $\delta = 0.2$  [8].

В случае равнокомпонентного исходного напряженного состояния

$$\tilde{s}_1^0 = \tilde{s}_2^0 = \tilde{s}_3^0 = q + (1 - \delta) p_0$$

Соответственно полные напряжения от горного давления в пласте будут

$$\tilde{q}_3 = q, \tilde{q}_1 = \tilde{q}_2 = q - \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} (1 - \delta) \Delta p_{nl}(t) \quad (2)$$

Отсюда следует, что при закачке газа, когда пластовое давление становится выше начального, что отвечает  $\Delta p_{nl}(t) > 0$ , полные напряжения в глубине пласта в горизонтальной плоскости  $\tilde{q}_1 = \tilde{q}_2$  становятся по абсолютной величине больше полного напряжения в вертикальном направлении  $\tilde{q}_3$  на величину  $(1 - 2\nu)(1 - \delta) \Delta p_{nl}(t) / (1 - \nu)$ . При отборе же газа, когда пластовое давление становится ниже начального, что отвечает  $\Delta p_{nl}(t) < 0$ , полные напряжения в глубине пласта в горизонтальной плоскости  $\tilde{q}_1 = \tilde{q}_2$  становятся по абсолютной величине меньше полного напряжения в вертикальном направлении  $\tilde{q}_3$  на ту же величину.

Изменение напряженного состояния в глубине пласта приводит к изменению напряжений, действующих в окрестности скважин, причем для вертикальных и горизонтальных скважин эти изменения будут разными. В случае вертикальной скважины изменение пластового давления при отборе и закачке газа приводит к изменению напряжений, действующих в породе на контуре скважины, но при этом во всех точках контура напряжения одинаковы, поскольку напряжения от горного давления  $\tilde{q}_1 = \tilde{q}_2$ , действующие в глубине пласта в горизонтальных плоскостях, равны друг другу.

В случае горизонтальной скважины ситуация иная. В этом случае скважина находится в поле напряжений от горного давления в глубине пласта  $\tilde{q}_1$  и  $\tilde{q}_3$ , которые не равны между собой. При этом вертикальное напряжение  $\tilde{q}_3$  при изменении пластового давления остается равным природному вертикальному горному давлению  $q$ , а напряжения в горизонтальной плоскости меняются – при  $p_{nl}(t) < p_0$  они меньше по абсолютной величине напряжения в вертикальном направлении  $q$ , а при  $p_{nl}(t) > p_0$  – больше. Соответственно и напряжения на контуре скважины будут разными.

На рис. 1 показаны кольцевое и радиальное напряжения  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_r$ , действующие в окрестности горизонтальной скважины в двух точках М и N. Вдоль оси скважины действует напряжение  $\sigma_z$ .

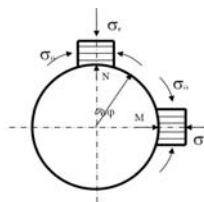


Рисунок 1. Напряжения, действующие в окрестности горизонтальной скважины относительно плоскостей напластования

Для условий Арбузовского ПХГ ( $H \approx 1250$  м,  $p_0 = 13.1$  МПа) на контуре вертикальной скважины максимальное сжимающее кольцевое напряжение  $\sigma_\theta$  по мере отбора газа из пласта возрастает по абсолютной величине с 33.92 МПа до 37.28 МПа, т.е. на 3.36 МПа.

Для горизонтальной скважины в точке М максимальное кольцевое сжимающее напряжение  $\sigma_\theta$  по мере отбора газа из пласта возрастает по модулю с 33.92 МПа до 44.66 МПа, т.е. на 10.74 МПа. В то же время в точке N по мере отбора газа напряжение  $\sigma_\theta$  возрастает по модулю с 33.92 МПа до 34.82 МПа, т.е. на 0.9 МПа.

Оценки с использованием критерия прочности Кулона-Мора, согласно которому условие достижения породой предельного состояния на площадке с нормалью  $n$  имеет вид  $\tau_n > c + |\sigma_n| \operatorname{tg} \rho$ , где  $\sigma_n$  и  $\tau_n$  – нормальное и касательное напряжения на площадке,  $c$  – коэффициент сцепления и  $\rho$  – угол внутреннего трения породы [9]. В главных напряжениях, которыми для точек на контуре горизонтальной скважины являются напряжения  $|\sigma_\theta| > |\sigma_z| > |\sigma_r|$ , критерий Кулона-Мора записывается как

$$\left| \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right| > \left| \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right| \sin \varphi + c \cos \varphi \quad (3)$$

В точке М на контуре скважины  $\sigma_\theta = -44.6$  Мпа,  $\sigma_r = -1.7$  МПа. При  $c = 8$  МПа,  $\rho = 25^\circ$  условие (3) выполняется, так что в этой точке предельное состояние достигается и следует ожидать разрушения породы. Таким образом, изменение исходного напряженного состояния в глубине пласта при изменении порового давления в пласте ПХГ действительно может стать причиной разрушения породы в ПЗП и выноса песка в скважину.

На основе развитой геомеханической модели были рассчитаны изменения напряжений, действующих в точках М и N на контуре горизонтальной скважины при закачке и отборе газа из коллектора Арбузовского ПХГ, и составлены соответствующие программы испытаний образцов пород на установке ИСТНН. По разработанным программам выполнено физическое моделирование деформационных и фильтрационных процессов, протекающих в призабойной зоне эксплуатационных скважин Арбузовского ПХГ под действием знакопеременных нагрузок при закачке и отборе газа.

*Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы № АААА-А17-117021310371-9 и частичной поддержке РФФИ, проект № 17-41-590148.*

#### Литература / References:

1. Каримов М. Ф. Эксплуатация подземных хранилищ газа. М.: Недра, 1981. 248 с.
2. Мирзаджанзаде А.Х., Кузнецов О.Л., Басниев К.С., Алиев З.С. Основы технологии добычи газа. М.:



- Недра, 2003. 880 с.
3. Башкатов А.Д. Предупреждение пескования скважин. М.: Недра, 1981. 176 с.
  4. Врачев В. В., Шафаренко В.П., Шустров В.П. Пескопроявление при эксплуатации ПХГ // Газовая промышленность. 1999. № 11. С. 62.
  5. Басниев К.С. Будзуляк Б.В. Зиновьев В.В. Повышение надежности и безопасности эксплуатации подземных хранилищ газа. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2005. 391 с.
  6. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Equipment for studying deformation and strength properties of rocks in triaxial loading. Geomechanics of oil and gas wells // Ser. "Advances in Oil and Gas Exploration and Production". Springer, 2020. pp. 61–70.
  7. Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1955. № 5. С. 3–41.
  8. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об упругом режиме эксплуатации нефтяного месторождения // ФТПРПИ. 1990. №1. С. 158–161.
  9. Терцаги К. Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961.



---

## **КОМПЛЕКСНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ РАЗГДКИ ФЕНОМЕНА «ПОЮЩИХ» ПЕЩЕР АНТИЧНЫХ ГОРОДОВ КРЫМА**

***Н.Б. Косых***

*Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Севастополь, Севастополь, ipnk5419@mail.ru*

История Крыма от античности до наших дней доставляет немало загадок для исследователей. К одной из них можно отнести наличие, так называемых «поющих» пещер, то есть помещений с ярко выраженными частотными резонансами и длительным эффектом реверберации (эха).

Чаще всего такие необычные помещения находятся в пещерных городах во второй гряде Крымских гор: Чуфут-Кале, Мангуп, Эски-Кермен, Чилтер [1]. Обращает на себя внимание тот факт, что не все пещеры обладают яркими акустическими свойствами, а те, что ими обладают, в свою очередь различаются по размерам, рельефу внутренней поверхности, частотному спектру резонансов, и пространственному расположению фокусов отдельных акустических мод. Исследуя детально перечисленные особенности каждой пещеры, то есть, по сути дела смоделировав «акустический портрет», можно предложить некоторые выводы о происхождении и назначении пещеры, и представить их на обсуждение смежных специалистов историков, краеведов, музыкантов-медиевистов, антропологов и др.

Для измерений рельефа внутренней поверхности пещер был использован метод ультразвукового сканирования эквидистантных горизонтальных профилей в локальной цилиндрической системе координат. Этот метод позволил исследовать помещения площадью от 8 до 100 кв.м с точностью до двух см. На рис.1 представлено сечение профиля пещеры в цитадели Мангуп в метрическом масштабе. Первичный визуальный осмотр пещеры помогает выделить особенные пещеры присутствием гладких сводов, круглых ниш и подобных тщательно высеченных в скале элементов. В зодчестве древнерусских храмов, например, Св. Софии Новгородской, церкви Св. Георгия в Старой Ладого, Мирожского монастыря г. Пскова, такие элементы называются голосниками, по сути являющиеся резонаторами. Метод позволил установить корреляционную связь между рельефными элементами и акустическими модами. Повышение точности профилей рельефа может быть достигнута применением когерентных оптических методов.

Измерение резонансов, а точнее пространственного распределения акустических

мод использовалось измерение АЧХ пещеры. На рис.2. показаны АЧХ в двух точках пещеры с различными акустическими модами. Звук различных частот генерировался высококачественным излучателем с минимальным коэффициентом нелинейных гармонических искажений, менее 0,01 % класса Hi End, и анализировался измерительным трактом с суперкардиоидным микрофоном с линейной передаточной характеристикой [2].

Результатом исследований стало несколько характерных акустических портретов, на основании которых предлагаются следующие выводы:

1) Пещеры примерно являются ровесниками княжества Феодоро, соседствуют с храмами византийской эпохи, например, церковь Трех всадников в Эски-Кермен, октагональная церковь в цитадели Мангуп.

2) Пещеры небольшой площади, до 7-8 м.кв , имеющие единственный резонанс, возможно, служили своеобразным камертоном для тренировки слуха начинающих певцов.

3) Резонансы пещеры находятся в диапазоне 200-350 Гц, что соответствует низким мужским голосам. Интервал между нотами примерно соответствует терции, что характерно для сосредоточенных, духовных песнопений.

4) Просторные залы, площадью более 50 кв. м с выраженной реверберацией (до 3-4 сек послезвучания) возможно, были хоральными залами для особо торжественных случаев.

5) Последнее замечание носит субъективный характер – при исполнении стихер древнерусского знаменного пения, слушатели в помещении испытывают особый психофизический эффект многоголосного (по сути хорового, близкого к органному) звучания интервалов, обертонов при том, что мелодия (cantus firmus) является монодией и исполняется в один голос.

В заключение следует отметить, что дальнейшие исследования можно развить до уровня восстановления ступеней звукоряда древних исполнителей. Наверняка этот звукоряд окажется близок к натуральному, то есть Пифагоровому строю [3], где соотношение частот определяется рациональной дробью, в отличие от привычного современному слушателю Веркмейстеровского (темперированного) строя.

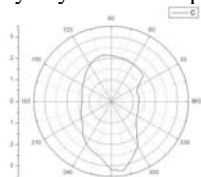


Рисунок 1. Сечение профиля пещеры в цитадели пещерного города Мангуп в метрическом масштабе, построенное в локальной цилиндрической системе координат.

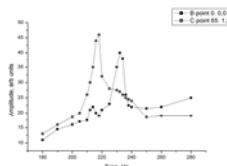


Рисунок 2. Амплитудно-частотные характеристики в точке начала локальной системы координат, и в точке, отстоящей на 1.2 м под азимутом 65°.

### Литература / References:

1. Головина Н.М. История Севастополя и окрестностей. Севастополь: Альбатрос, 2018.
2. Алдошина И.А. Музыкальная акустика. СПб., 2009.
3. Шялов Г.Е. Простая гамма: устройство музыкальной шкалы. М.: Наука, 1980.



## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ СПЕКТРА ШТОРМОВЫХ ВОЛН НАД ГРЯЗЕВЫМИ БАНКАМИ

С. Кузнецов<sup>1</sup>, С. Волвакиер<sup>2</sup>, Я. Сапрыкина<sup>1</sup>, С. Коттеппад<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, kuznetsov@ocean.ru,  
saprykina@ocean.ru

<sup>2</sup> CSIR-National Institute of Oceanography, Dona Paula, Goa, India, vsamiksha@nio.org,  
kotteppad@nio.org

Грязевые банки образуются в береговой зоне за счет переноса илистых мелкодисперсных наносов с относительно больших глубин ближе к берегу интенсивным штормовым волнением и порождаемыми им течениями и удержанием этих наносов в диапазоне глубин 5-15 м в зависимости от схем рефракции волн над особенностями рельефа дна и самими банками [1]. Точный механизм их формирования до сих пор остается неизвестным, однако ясно, что штормовые волны создают эти образования, а затем сами линейным и нелинейным образом трансформируются над ними из-за изменения условий распространения – уменьшения эффективной глубины, изменений плотности и вязкости среды, обеспечивая длительное существование грязевых банок в течении всего муссонного периода. Образование грязевых банок уменьшает разрушительное действие волн на берега, так как высота уменьшается из-за диссипативных процессов и обрушения волн, частота волн уменьшается за счет нелинейных эффектов и частотной избирательности диссипации их энергии.

Согласно современным теориям транспорта наносов под действием волн, именно нелинейные особенности структуры волнения, ответственны за транспорт наносов в береговой зоне моря, в том числе за формирование грязевых банок. Натурные измерения волн автономными буями в Алаппуже, штат Керала, Индия, в июле 2014 г. на весьма отмелых берегах Аравийского моря, демонстрируют диссипативные и нелинейные особенности их трансформации, такие как уменьшение значительной высоты волн и относительный рост энергии на нижнем боковом лепестке спектра волнения [2]. Для разделения влияния диссипации и нелинейности мы оценили роль нелинейности с помощью биспектрального анализа волновых хронограмм, измеренных в одном и том же месте в разное время при наличии и отсутствии грязевых банок. Типичное преобразование волновых спектров с глубины 15 м до 7 м при отсутствии и при наличии грязевых банок показано на рис. 1. Бимодальная структура спектров с хорошо выраженными пиками на частотах 0.06 Гц и 0.09 Гц сохраняется при распространении волны в прибрежной зоне, как при наличии, так и при отсутствии грязевых банок. Вычисленные значения возведенных в квадрат функций бикогерентности, показанные на рис. 2, доказывают нелинейные связи волновых гармоник, обеспечиваемые этими спектральными пиками. Относительно высокие значения би-когерентности на частотах главных спектральных пиков демонстрируют существование суммарных триадных волновых взаимодействий, передающих энергию на суммарную частоту. Высокие значения бикогерентности в отрицательном частотном диапазоне (не показаны здесь из-за недостатка места) подтверждают обратную передачу энергии от суммарной гармоники к первой. Отсутствие равномерного частотного перераспределения и обратного переноса энергии обеспечивает относительный рост энергии на более низкой спектральной боковой полосе. Сходные нелинейные особенности преобразования волновых спектров и гораздо более сильную диссипацию волновой энергии в случаях присутствия, чем при отсутствии грязевых банок, позволяют разделить влияние нелинейности и диссипации на процесс трансформации волн волнового преобразования над грязевыми банками. Было

обнаружено, что нелинейность отвечает за перераспределение энергии в спектре, тогда как диссипация - только за уменьшение общей энергии волны. В ходе презентации будет рассмотрен вопрос о фазовом сдвиге между волновыми гармониками и его влиянии на перенос мелкодисперсных осадков, проясняющий механизм образования грязевых банок.

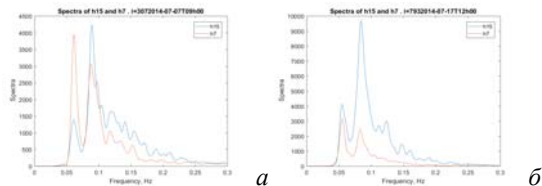


Рисунок 1. Двухпиковая (0.06 Гц и 0.09 Гц) эволюция спектра волнения с глубины 15 м на глубину 7 м. а) в отсутствие грязевой банки б) над грязевой банкой.

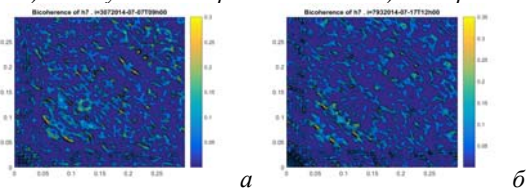


Рисунок 2. Квадраты функций бикогерентности волнения на глубине 7 м, чьи спектры показаны на рис. 1.

Работа выполнена в рамках российско-индийского проекта РФФИ 18-55-45026 ИНД\_а.

#### Литература / References:

1. Mathew J., Baba M. Mudbanks of SW coast of India. II: wave-mud interaction // J. Coast. Res. 1995. V. 11. pp. 178–187.
2. Samiksha S.V., Vethamony P., Rogers W.E., Pednekar P.S., Babu M.T., Dineshkumar P.K. Wave energy dissipation due to mudbanks formed off southwest coast of India // Estuar. Coas. Shelf Sci. 2017. V. 196. pp. 387–398. DOI 10.1016/j.ecss.2017.07.018



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЯРНОЙ ДЕПРЕССИИ В РАМКАХ МОДЕЛИ WAVEWATCH III

*А.М. Кузнецова, Е.И. Поплавский, Н.С. Русаков, Ю.И. Троицкая*

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, [umnyagin@yandex.ru](mailto:umnyagin@yandex.ru)*

Поверхностное ветровое волнение, возникающее при аномальных метеоусловиях, в современных волновых моделях предсказывается хуже, чем при типичных метеоусловиях. Также и задача моделирования ветрового волнения в условиях полярной депрессии требует развития. Для моделирования ветрового волнения в условиях полярной депрессии выбрана акватория Баренцева моря, где наблюдается большое количество полярных ураганов. Среди идентифицированных полярных ураганов [1] был выбран ураган, имевший место 05.02.2009, наблюдавшийся в координатах 69° с.д., 40° в.ш. Моделирование было проведено в рамках модели WAVEWATCH III (WW3) [2].

Была рассмотрена прямоугольная расчетная сетка исследуемой акватории, составленная в допущении о малости изменения кривизны на малых изменениях широт

(66.5°–71° с.ш., 30°–50° в.д.). При расчете волнения в волновой модели использовался следующий набор параметризаций: схемы ST4 [3] и ST6 [4, 5] для генерации волн (как наиболее современные и разрабатываемые мировым научным сообществом); схема DIA (Discrete Interaction Approximation) для расчета нелинейных взаимодействий; схема JONSWAP для учета влияния придонного трения. Спектральное разрешение модели составило 24 направлений, частотный диапазон 32 интервалов от 0.0373 до 0.787 Гц. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового действия составлял 150 секунд, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии составлял 2 секунды, шаги по времени для передачи энергии по спектру составляли 25 секунд.

В первую очередь было проведено моделирование волнения в условиях полярной депрессии на воде, свободной ото льда. Анализ результирующего распределения значительных высот волнения с использованием параметризаций накачки ветром ST4 и ST6 показал, что параметризация ST6 показала более высокие значительные высоты волн, нежели параметризация ST4. Параметризация ST6 – параметризация BYDRZ, апробированная в том числе в штормовых условиях Северного моря [6]. Однако, как показано в [7], параметризация ST6 получена в специфической локализации, и имеет большие ошибки при расчетах в Арктическом регионе. Поэтому для дальнейшего использования была выбрана параметризация ST4.

Дальнейшим шагом стал учет влияния льда в модели. В WW3 он может быть реализован при помощи подключения ряда параметризаций: процессы затухания, активируемых с помощью переключателей IC0, IC1, IC2, IC3 и IC4, которые могут быть объединены с различными вариантами эффектов рассеяния IS0, IS1 и IS2. Схема IC0 для учета влияния льда – простейшая схема, где при сплоченности льда более 25% узел сетки считается покрытым льдом, и включается экспоненциальное затухание волновой энергии с поправкой на сплоченность льда в данном узле [2]. Параметризация IC1 разработана авторами E. Rogers and S. Zieger, IS1 – S. Zieger. В параметризации можно управлять параметром  $C_{ice,1}$ , отвечающим за коэффициент экспоненциального затухания волн. В параметризации IS1 предполагается, что размер льдины меньше шага сетки, и доля приходящей волновой энергии  $\alpha_{ice}$  рассеивается изотропно. На каждой дискретной частоте и направлении волновая энергия уменьшается на величину  $\alpha_{ice}$  и перераспределяется на все направления на той же самой частоте для сохранения энергии. Учитываемое распределение льда приведено на рис. 1.

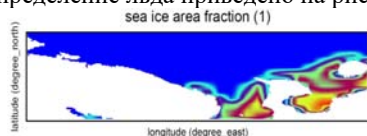


Рисунок 1. Распределение концентрации льда в проводимом расчете.

Результаты расчета значительных высот волнения в присутствии льда с использованием параметризаций IC0, IS0 и IC1, IS1 показывают близкие результаты. Они позволяют учесть присутствие льда, однако не приспособлены к учету его разрушения. Моделирование разрушения льда волнением при интенсивном арктическом шторме реализовано при помощи модели WW3 с подключением модуля IS2. Данный модуль описывает диссипацию волн в присутствии плавучего льда и основан на подходе Мейлана и Мэссона [8], к которому была добавлена оценка разрушения льда волнами, благодаря чему появилась возможность изменять максимальный размер льдин. Оценка среднего диаметра льдин основана на предположении о степенном законе распределения льдин по размерам. При оценках

минимального и максимального размеров льдин предполагается, что разрушение волнами приводит к образованию льдин с размером, равным половине длины волны.

Данный метод был применен в совокупности с модулем IC2, где учет морского льда требует решения нового дисперсионного уравнения [2]. На рис. 2 показано изменение значительных высот волн с течением времени. Видно разрушение и последующее распространение волнение в область, содержащую лед.

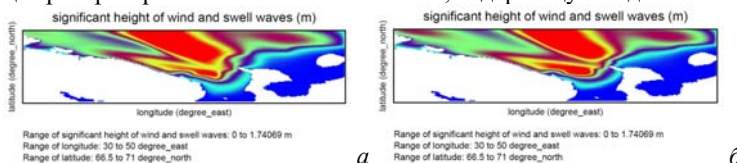


Рисунок 2. Распределение значительных высот волнения при использовании параметризации учета льда IC2, IS2 в момент времени  $t=1$  (а) и  $t=2$  (б).

Для выбранного полярного урагана проведено моделирование ветрового волнения на воде, свободной ото льда, в рамках модели WAVEWATCH III (WW3) и сделан вывод об оптимальном наборе параметризаций модели. Учет влияния льда в модели был реализован рядом способов. Применение простейших моделей IC0, IS0 и IC1, IS1 демонстрирует близкие результаты. Они позволяют учесть присутствие льда, однако не приспособлены к учету его разрушения. Моделирование разрушения льда волнением при интенсивном арктическом шторме реализовано при помощи модели WW3 с подключением модуля IS2. Результаты моделирования показывают разрушение и последующее распространение волнение в область, содержащую лед. Для верификации данных модельных расчетов будут использованы альтиметрические измерения. Для анализа высоты поверхности Баренцева моря будут использоваться данные спутников ERS-2 и Envisat.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 18-05-60299.

### Литература / References:

1. Noer G, Lien T. Dates and Positions of Polar lows over the Nordic Seas between 2000 and 2010. Norwegian Meteorological Institute Rep. 2010.
2. The WAVEWATCH III R Development Group (WW3DG), 2016: User manual and system documentation of WAVEWATCH III R version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices.
3. Ardhuin F., Rogers E., Babanin A., Filipot J.-F., Magne R., Roland A., Van der Westhuysen A., Queffelec P., Lefevre J.-M., Aouf L., Collard F. Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves: Part I, definitions, calibration and validations // *J. Phys. Oceanogr.* 2010. V. 40. pp. 1917–1941.
4. Rogers W.E., Babanin A.V., Wang D.W. Observation-consistent input and whitecapping dissipation in a model for wind-generated surface waves: Description and simple calculations // *J. Atm. Oceanic Tech.* 2012. V. 29(9). pp. 1329–1346.
5. Zieger S., Babanin A.V., Rogers W.E., Young I.R. Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH // *Ocean Modell.* 2015. V. 96. pp. 2–5.
6. van Vledder G.P., Hulst S.T., McConochie J.D. Source term balance in a severe storm in the Southern North Sea // *Ocean Dyn.* 2016. V. 66(12). pp. 1681–1697.
7. Liu Q., Rogers W.E., Babanin A., Li J., Guan C. Spectral Modeling of Ice-Induced Wave Decay // *J. Phys. Oceanogr.* 2020. V. 50(6). pp. 1583–1604.
8. Meylan M.H., Masson D. Physics-based parameterization of air-sea momentum flux at high wind speeds and its impact on hurricane intensity predictions // *Ocean Mod.* 2006. V. 11. pp. 417–427.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОКЕАНСКИХ ВОЛН ПО ФОТОСНИМКУ С МКС

*С.А. Кумакиев*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН, Москва, kumak@ipmnet.ru*

В течение нескольких лет с борта Российского сегмента МКС космонавтами рамках космического эксперимента (КЭ) "Ураган" осуществляется визуальное наблюдение с регистрацией на видео — фото аппаратуру различных районов и событий на поверхности Земли и в околоземном пространстве [1]. Делается это с конечной целью разработки критериев оперативной классификации и дешифрирования признаков зарождения и проявления природных и техногенных катастрофических явлений. В архиве по КЭ "Ураган" имеются фотоснимки различных систем океанских волн, представляющих интерес с точки зрения оперативного дешифрирования событий катастрофического типа в океане.

**Анализируемый объект.** На рис. 1 представлен фотоснимок участка океана размерами 12 на 8 км с волновой системой, выбранной для дешифрирования. На снимке видны несколько групп волн. Система кольцевых волн была выбрана как объект дешифрирования по следующим причинам:

- 1) эта система может быть отнесена к категории опасных волн (например, типа волн цунами) с большими основаниями из-за ее формы и протяженности, чем видимые на рисунке корабельные волны;
- 2) волны системы были созданы достаточно мощным локализованным источником;
- 3) по фотоснимку можно оценить характерные геометрические параметры начального возмущения: его горизонтальные размеры и положение эпицентра;
- 4) на фотоснимке видны не только гребни основных кольцевых волн, но и регулярные структуры коротких волн около этих гребней.

**Физическая модель волновой системы.** Зафиксированная на рис. 1 волновая система могла образоваться либо из-за падения в океан метеорита, либо из-за взрыва (подводного или на поверхности океана). Последний источник волн представляется более вероятным, поскольку обсуждаемый район океана находится не очень далеко от крупной военно — морской базы НорФолк (восточное побережье США). Была принята весьма простая физическая модель: считается, что волны возбудились в результате того, что у свободной поверхности жидкости мгновенно образовалась полость параболической формы, которая описывается уравнением

$$\eta_e(r) = \begin{cases} H_e \left[ 2 \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 1 \right], & r \leq R, \\ 0, & r > R. \end{cases} \quad (1)$$

В (1)  $r$  есть полярный радиус;  $\eta_e(r)$  есть вертикальное отклонение свободной поверхности жидкости в полости от ее невозмущенного плоского горизонтального положения;  $H_e$  — максимальное углубление полости в жидкость. Характерные параметры  $R$  и  $H_e$  полости (в метрах) связаны с энергией взрыва  $E$  (в Дж) следующими соотношениями:  $R = 0.04E^{0.3}$ ,  $H_e = 0.02E^{0.24}$ . Атмосферное давление на свободной поверхности жидкости принималось равным нулю. Вязкость жидкости не учитывалась. Все рассмотрение велось в рамках линейной теории в предположении, что высота моделируемых океанских волн во много раз меньше их длины.

**Математическая модель волновой системы, ее точное и асимптотическое решения.** Расстояние  $r$  от эпицентра начального возмущения до самой удаленной от



него точки волн было около 6000 м. Была принята следующая математическая модель: предполагается, что глубина океана бесконечная, а движение жидкости осесимметричное. Считается, что при  $t=0$  форма свободной поверхности жидкости задана уравнением (1). За основную искомую величину принимается вертикальное отклонение  $\eta(r,t)$  поверхности жидкости в момент  $t \geq 0$ . Введем цилиндрическую систему координат с двумя координатами  $(r, z)$ . Введем потенциал  $\Phi(r, z, t)$  скорости  $v(r, z, t)$  жидкости по формуле  $v(r, z, t) = \nabla\Phi(r, z, t)$

Тогда для нахождения  $\eta(r,t)$  надо решить следующую начально-краевую задачу для функций  $\Phi(r, z, t)$  и  $\eta(r,t)$  при  $t > 0, 0 \leq r < \infty$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \Phi(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi(r, z, t)}{\partial z^2} = 0, \quad \frac{\partial \eta(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial \Phi(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad \eta(r, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi(r, z, t)}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (2)$$

с начальными условиями

$$\eta(r, 0) = \eta_c(r), \quad \frac{\partial \eta}{\partial t}(r, 0) = 0 \quad (3)$$

Задачу (2)-(3) будем называть математической моделью волновой системы. Решение этой задачи может быть получено путем применения преобразования Фурье-Бесселя по переменной  $r$ . Окончательная формула для возвышения свободной поверхности жидкости  $\eta(r,t)$  такова

$$\eta(r, t) = -H_c R \int_0^\infty J_3(Rk) \cos(\sqrt{gkt}) J_0(rk) dk, \quad (4)$$

где через  $J_3(Rk)$  и  $J_0(rk)$  обозначены функции Бесселя третьего и нулевого порядков с аргументами  $(Rk)$  и  $(rk)$ , соответственно. Формула (4) есть точная формула для  $\eta(r,t)$ . В ней при проведении расчетов удобнее перейти к безразмерным переменным

$$\gamma = \sqrt{\frac{g}{R}} t, \quad \xi = \frac{r}{R}, \quad \kappa = kR, \quad (5)$$

в которых  $\eta(\xi, \gamma)$  принимает вид

$$\eta(\xi, \gamma) = -H_c \int_0^\infty J_3(\kappa) \cos(\gamma\sqrt{\kappa}) J_0(\xi\kappa) d\kappa \quad (6)$$

Несмотря на кажущуюся простоту формул (4) и (6), расчеты по ним удается проводить просто и быстро при не очень больших значениях  $\gamma$  и  $r$ . Если же выполняются условия  $\gamma \gg 1, \xi \gg 1$  то из (6) можно методом стационарной фазы получить удобную для расчетов асимптотическую формулу

$$\eta(\xi, \gamma) = -\frac{\sqrt{2}H_c}{\xi} J_3\left(\frac{\gamma^2}{4\xi^2}\right) \cos\left(\frac{\gamma^2}{4\xi}\right), \quad (7)$$

в которой безразмерные  $\xi$  и  $\gamma$  выражаются через размерные  $r$  и  $t$  по формулам (5).

**Смоделированная система океанских волн; оценки параметров начального возмущения и глубины океана.** В процессе расчета возбуждения волн с различными значениями входящих в них физических параметров, ставилась задача по возможности точнее приблизить смоделированную волновую систему к изображению реальной на фотоснимке рис. 1. По достижении этого можно было сделать заключение об энергии взрыва  $E$ , а через нее вывести оценки параметров начального возмущения, т.е. характерного радиуса полости  $R$  и ее глубины  $H_c$ , а так же через сколько времени после взрыва был сделан фотоснимок. На рис. 2 изображен профиль волн, т.е. зависимость возвышения свободной поверхности  $\eta(r,t)$  от  $r$  в указанный ниже момент времени  $t$ . Он был рассчитан по асимптотической формуле (7). Величины  $\eta(r,t)$  и  $r$  на рис. 2 даны в метрах. Высота рассчитанных волн оказалось небольшой, порядка 0.1 м. Тем не



менее, такие волны могут фиксироваться на фотоснимке из космоса, если они образуют достаточно правильную и протяженную в горизонтальных направлениях систему.



Рисунок 1. Система кольцевых океанских волн, выбранная для идентификации.

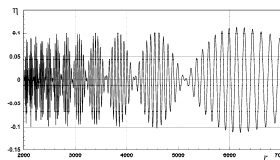


Рисунок 2. Профиль волн, рассчитанный по предложенной модели.

**Выводы.** Анализируя расположение максимумов волн из рис. 2 видно, что смоделированная волновая система (ее волновые пакеты) похожа на систему кольцевых волн с рис. 1.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 18-01-00812) и по теме государственного задания АААА-А17-117021310387-0.*

#### Литература / References:

1. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Крикалев С.К., Кумакшев С.А., Секерж-Зенькович С.Я. Идентификация системы океанских волн по фотоснимкам из космоса // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2009. Т. 1. С. 117–127.



---

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЯТЕН СОЛЕННОЙ ВОДЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ПО СКЛОНУ ДНА

*А.Е. Курпянова<sup>1,2</sup>, В.А. Гриценко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Балтийский федеральный университет им. И.Канта, Калининград, rector@kantiana.ru*

<sup>2</sup> *Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, ioran@atlantic.ocean.ru*

Возникновения потоков более холодных вод как в виде плотностных течений вдоль склона дна, так и в виде интрузионных течений зафиксированы во многих натуральных наблюдениях [1,2] как отклик на выхолаживание прибрежных вод с поверхности. Анализ результатов натуральных наблюдений говорит об отсутствии постоянства распространения такого рода вдольсклоновых течений в морских прибрежных водах и при каскадинге в озерах, вплоть до прерывания их расхода. Однако, результаты наблюдений, выполняемых обычно с недостаточно подробностью во времени, описывают итог процесса выхолаживания за достаточно протяженный период времени. Надежно фиксируются при этом только вдольсклоновые потоки вод с отрицательной плавучестью или квазиоднородные по плотности слои воды. Все промежуточные фазы проникновения потока отрицательной плавучести в подповерхностные воды не рассматривается из-за отсутствия данных.

Целью работы стала детализация при помощи лабораторных и численных экспериментов процесса проникновения вод с большей плотностью в глубину на мелководье. Лабораторные эксперименты позволили обнаружить ряд важных обстоятельств. Погружение формируемых в поверхностном слое пресной воды малых объемов (~3 мл) соленой воды (пятен) и их последующее движение вдоль склона дна происходило с малыми скоростями (4-5 мм/сек) из-за малого значения добавочной плотности (~0.0001 г/см<sup>3</sup>). Несмотря на вихревой характер движения и вовлечение в

себя пресной воды пятна в течение всего периода движения сохраняли слоистость своей плотностной структуры. Перечисленные обстоятельства позволили ограничиться в расчетах только ламинарным случаем течений.

Расчеты на нелинейной 2d-модели ( $\omega$ ,  $\psi$ ,  $\sigma$ ) динамики неоднородной по плотности жидкости с дополнительными уравнениями трассеров для идентификации вод пятен [3] позволили выполнить детализацию процесса взаимодействия двух пятен соленой воды в процессе их движения по склону дна. Анализ эволюции расчетных течений позволил выделить четыре основных этапа взаимодействия пятен между собой.

Сочетание лабораторных и численных экспериментов позволило описать схему погружения с поверхности пресной воды конечных объемов соленой воды, достижения ими склона дна и движения по нему. Выделены четыре этапа взаимодействия двух пятен между собой и их объединение в единый объект с сохранением слоистой плотностной структуры.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00717 (лабораторные эксперименты) и госзадания № 0149-2019-0013 (модельные расчеты).*

### **Литература / References:**

1. Чубаренко И.П. Горизонтальный конвективный водообмен над подводным склоном: механизм формирования и анализ развития // Океанология. 2010. Т. 50. №2. С. 184–193.
2. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М.: Мир, 1977. 431 с.
3. Волкова А.А., Грищенко В.А. Особенности циркуляции, возникающей при погружении с поверхности конечного объема воды с отрицательной плавучестью // Фунд. Прикл. Гидрофиз. 2019. Т. 12. № 3. С. 26–35.



---

## **ВИРТУАЛЬНАЯ СКВАЖИНА КАК ИНСТРУМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

*А.Е. Куприянова, Г.С. Михневич*

*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград,  
united\_jemelt8@mail.ru, mi78galina@mail.ru*

Обеспечение населения водой, удовлетворяющей по своим характеристикам санитарно-гигиеническим нормативам, является необходимым элементом устойчивого развития региона [1]. Усиление антропогенной нагрузки в результате интенсификации сельского хозяйства, промышленности и развития инфраструктурных объектов вызывает трансформацию химического состава и физических свойств подземных вод, выступающих в качестве источника водоснабжения [2]. В Калининградской области подземные воды являются основным ресурсом для хозяйственно-питьевого водоснабжения во всех населенных пунктах (за исключением г. Калининграда). Хозяйственное освоение территории региона автоматически ставит вопрос о решении проблемы водоснабжения различного рода потребителей (малые предприятия, фермерские хозяйства, поселки и т.д.).

При проектировании системы водоснабжения за счет подземных вод необходимо знание вертикальной геологической структуры в непосредственной близости от потребителя [3, 4]. Однако объем имеющихся скважин относительно невелик, а плотность, с которой скважины располагаются на местности, различна. Как следствие возникает проблема прогноза вертикальной геологической структуры в точке, выбранной для предполагаемого бурения. За фактическую основу будут взяты описания вертикальной геологической структуры по буровым данным, произведенным в

различные годы при организации скважинных водозаборов в окрестностях исследуемой точки.

Для решения поставленной задачи предлагается построение т.н. «виртуальной скважины». Под виртуальной скважиной предлагается понимать реконструкцию вертикальной геологической структуры для окрестности точки на выбранном участке земной поверхности, на котором предполагается решить проблему водопользования, и выполненную на основе описаний геологического строения ранее пробуренных и рядом расположенных скважин. Построение виртуальной скважины позволит спроектировать процесс бурения реальной скважины и рассчитать соответствующую зону санитарной охраны [4].

Для построения виртуальной скважины на выбранном участке территории региона предполагается использование геологических данных почти двух тысяч буровых скважин [1, 3], которые содержат информацию о геологической среде Калининградской области. Известно, что распределение параметров в вертикальной геологической структуре по буровым данным происходит только по геологическим слоям (породам), мощность которых может составлять единицы, десятки и сотни метров. Для удобства реализации расчетного алгоритма все слои используемых геоданных (реальных скважин) будут приведены к единому формату описания через 1 метр, а геологический смысл каждого метрового слоя будет отражен в значении ключевого параметра для расчета - коэффициенте фильтрации текущей породы.

Алгоритм проектирования параметров виртуальной скважины будет использовать значения параметров рядом лежащих реальных скважин, выполняя их аппроксимацию на одинаковой глубине в рассчитываемую горизонтальную структуру виртуальной скважины. Метод аппроксимации позволит при расчете учитывать расстояния от виртуальной до реальных скважин и значения коэффициентов фильтрации на текущем горизонте. При расчете параметров виртуальной скважины предполагается рассмотреть как линейный, так и нелинейные варианты расчетов. Линейный подход – двумерной линейной интерполяцией, нелинейный – параболоидом интерполяции.

По завершении построения всех необходимых параметров для выбранной расчетной точки региона предполагается обратный переход – от значений коэффициентов фильтрации к геологическим параметрам слоев, что позволит определить необходимые условия для водоснабжения выбранного участка потребителя. Среди всех искоемых параметров одним из главных является глубина нахождения первого от поверхности московско-валдайского межморенного водоносного горизонта Калининградской области, который наиболее широко используется в водоснабжении региона [3].

По результату работы предполагается совершить расчет зоны санитарной охраны для выбранного участка, где будет происходить его застройка малым предприятием, фермерским хозяйством и др. Сконструированный алгоритм «виртуальной скважины» можно будет внедрить в ГИС-систему региона как программный модуль.

Таким образом, была выполнена постановка задачи организации водоснабжения малых предприятий, фермерских хозяйств, частных домов с помощью модели «виртуальной скважины». Был представлен алгоритм проектирования параметров для виртуальной буровой скважины, использующий информацию о собранных геоданных почти двух тысяч буровых скважин по Калининградской области. Реализация модели «виртуальной скважины» позволит получить необходимые рекомендации для развития водоснабжения на участке предполагаемого строительства.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства*

#### **Литература / References:**

1. Гриценко В.А., Михневич Г.С., Новикова Е.П. Комплексная оценка геоэкологических опасностей полигонов твердых бытовых отходов на подземные воды Калининградской области // Тр. III Всерос. Конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: Химиздат, 2019. С. 251–255.
2. Воистинова Е.С., Парфенова Г.К. Устойчивое развитие территорий и геоэкологические проблемы водопользования (на примере Кемеровской области) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. № 4. С. 312–318.
3. Михневич Г.С. Пространственная дифференциация территории Калининградской области по степени защищенности подземных вод от загрязнения // География: проблемы науки и образования. Соломин В.П., Субетто Д.А., Ловелиус Н.В. (ред.). СПб.: Астерион, 2011. С. 129–132.
4. Орадковская А.Е., Лапшин Н.Н. Санитарная охрана водозаборов подземных вод. М.: Недра, 1987. 167 с.



---

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ СЕЗОННОГО ТЕРМОКЛИНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СКОРОСТИ ОСНОВНОГО ЧЕРНОМОРСКОГО ТЕЧЕНИЯ (ПО ДАННЫМ ДРИФТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА)**

***Н.Е. Лебедев, А.А. Сизов, Т.М. Баянкина***

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, nick\_leb@mail.ru*

Изучение верхнего квазиизотермического слоя (ВКС) Черного моря существенно связано с уровнем развития измерительной аппаратуры. Использование дрейфующих буев с термокосоми (дрифтеров) открыло новые возможности в исследовании ВКС и сезонного термоклина, в том числе в зоне Основного черноморского течения (ОЧТ) [1]. Привлечение спутниковых данных по альтиметрии для расчёта геострофической скорости ( $V_g$ ) [2, 3], позволило по данным термокос дрифтеров получить оценки теплового состояния верхнего слоя моря и реакции термоклина на вариации скорости ОЧТ [4]. Но механизм процесса, приводящего к деформации термоклина и холодного промежуточного слоя в зависимости от скорости ОЧТ, остался невыясненным. Здесь предлагается возможное его объяснение.

Ввиду отсутствия данных полной скорости ОЧТ, вместо неё в расчётах использованы данные  $V_g$ , которые восстанавливались по данным спутниковой альтиметрии и средней динамической топографии [2].

Для анализа выбирались участки траектории дрифтеров, где они не были захвачены синоптическими или мезомасштабными вихрями, а перемещались в стрекне ОЧТ. Было выбрано три таких участка (субрегиона): в юго-западной части моря (1), восточной (2) и у Южного берега Крыма (ЮБК) (3). Эти субрегионы и траектории дрифтеров показаны на рис. 1.

Анализировался временной интервал с января 2013 г. по февраль 2014 г., когда завершился очередной дрифтерный эксперимент. Выбирались условия, соответствующие гидрологической зиме (январь – март), когда вследствие плотностной конвекции и турбулентного перемешивания сезонный термоклин в основном сформирован [5]. Оценка глубины его верхней границы (совпадающей с нижней границей ВКС) проводилась по осреднённым за сутки профилям температуры,

построенным по данным термокос дрейфтеров [1].

В каждом выбранном субрегионе исходя из положения дрейфтера относительно зоны максимальных значений  $Vg$  (струи ОЧТ) были выбраны те участки траектории, где он перемещался в струе ОЧТ.

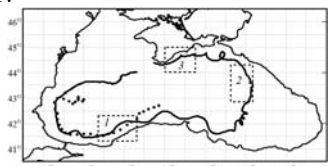


Рисунок 1. Траектории двух дрейфтеров: с 14.12.2012 по 31.03.2013 - сплошная линия, с 01.01.2014 по 10.02.2014 - точечная, и субрегионы, по которым выполнялись расчёты.

Связь среднесуточных значений изменчивости верхней границы термоклина ( $Z$ ) с изменчивостью  $Vg$  показана на рис. 2. В субрегионе 2 (рис. 2, в) рост  $Vg$  на 0,07 м/с с 5 по 9 марта 2013 г., сопровождался заглужением  $Z$  на 15 м. У ЮБК (рис. 2, г) с ростом  $Vg$  на 0,17 м/с с 26 по 28 марта 2013 г.,  $Z$  заглужилась на 10 м. С другой стороны, при уменьшении  $Vg$  на 0,15 м/с с 28 по 30 марта,  $Z$  поднялась на 15 м. Приведенные оценки изменения  $Z$  в зависимости от  $Vg$ , хоть и приближительны, тем не менее показывают, что этот процесс не случаен и наблюдается как в юго-западной, так и в восточной частях моря. Также были сделаны оценки интенсивности изменения  $Z$ , м/сут в зависимости от скорости изменения  $Vg$  в течение суток. Они показывают, что при росте  $Vg$  на 0,01 м/с в сутки,  $Z$  увеличивалась на 4 м. При таком же уменьшении  $Vg$ ,  $Z$  уменьшалась на 2 м. Эти оценки показывают, что заглужение границы термоклина происходило более интенсивно, чем её подъём на меньшие глубины.

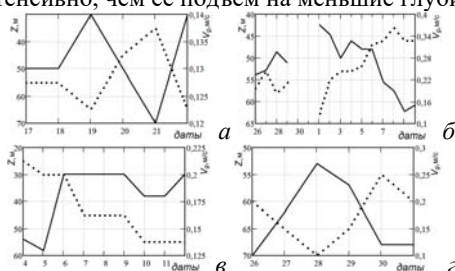


Рисунок 2. Временные изменения глубины верхней границы термоклина  $Z$  (точки) и геострофической скорости ОЧТ  $Vg$  (сплошная линия). Субрегион 1: а – январь 2013 г.; б – январь, февраль 2014 г.; субрегион 2: в – март 2013 г.; субрегион 3: г – март 2013 г.

Во второй половине января – начале февраля 2013 и 2014 гг. дрейфтер находился в одном и том же субрегионе 1. Как видно, рост  $Vg$  19.01.2013 г. сопровождался заглужением  $Z$ , а последующее ослабление  $Vg$  21.01.2013 г. – к подъёму  $Z$  на меньшие глубины (рис. 2, а). Еще большая согласованность в изменчивости этих характеристик наблюдалась в 2014 г.

Зависимости  $Z$  от  $Vg$  можно представить в виде регрессии, с учётом пространственно-временных особенностей в каждом субрегионе. Вычислив отклонения  $Vg$  за каждые сутки от средней её величины за весь интервал наблюдения для каждого из приведенных на рис. 2 случаев, получим ряд аномалий геострофической скорости ( $V'g$ ). Аналогично вычислим ряд аномалий величин  $Z$  ( $Z'$ ). Коэффициент корреляции  $R(V'g, Z') = 0,52$  на уровне 95% доверительной вероятности. Линейная регрессия  $Z'(V'g)$  имеет вид  $Z', м = 60,4 V'g, м/с + 0,42$ . Таким образом, аномалии  $Z'$  и  $V'g$ , обобщенные

по всем трём субрегионам показывают, что возрастание  $V/g$  приводит к увеличению  $Z$ , а ослабление вызывает подъём верхней границы термоклина на меньшие глубины.

Возможный механизм деформации термоклина можно представить с учетом результатов лоткового эксперимента [6]. Он показал, что с продвижением придонного потока, в вышележащих слоях стратифицированной жидкости наблюдаются характерные волнообразные колебания. В дальнейшем существование подобных возмущений, вносимых придонными гравитационными течениями в вышележащие слои, было изучено в [7].

С другой стороны, согласно обобщению результатов многолетних наблюдений [5], вертикальный профиль ОЧТ показывает максимальные значения скорости (струя ОЧТ) на глубине 10 – 20 м, что выше положения верхней границы термоклина (40 – 60 м). Совокупность этих сведений даёт основание полагать, что струя ОЧТ аналогичным образом приводит к возмущению зоны ВКС и термоклина.

Подтверждение реальности такого возмущения можно найти в [8]. В ней анализируются гидрологические разрезы, выполненные в районе ОЧТ западнее Крыма и у Анатолийского побережья. Нами было выполнено сопоставление скорости ОЧТ и положение изотерм и изохалин в районе струи ОЧТ, представленных в этой работе. Оказалось, что на горизонтах, меньших/больших глубины струи ОЧТ, изотермы и изохалины изгибались в область меньших/больших глубин. Эти результаты можно считать подтверждением на качественном уровне возможности интерпретирования вышеописанных возмущений термоклина как возмущений, вызываемых струей ОЧТ.

Полученные результаты показывают, что в зоне ОЧТ динамика верхней границы термоклина связана с изменением скорости течения. Интенсификация ОЧТ вызывает заглупление термоклина, а ослабление приводит к подъёму его верхней границы на меньшие глубины.

*Работа выполнена по темам № 0827-2020-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата» (Шифр «Взаимодействие океана и атмосферы») и № 0827-2020-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (Шифр «Оперативная океанология»).*

#### **Литература / References:**

1. Гриценко В.А., Чубаренко И.П. Об особенностях структуры фронтальной зоны придонных гравитационных течений // *Океанол.* 2010. Т. 50 (1). С. 32 – 39.
2. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. *Океанография Черного моря.* Севастополь: ЭкоСи-Гидрофизика, 2011. 212 с.
3. Кубряков А.А., Станичный С.В. Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений // *Иссл. Земли из космоса.* 2011. № 5. С. 24 – 30.
4. Толстошеев А.П., Лунёв Е.Г., Мотыжёв С.В. Анализ результатов натуральных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах Мирового океана // *Мор. гидрофизич. журнал.* 2014. № 5. С. 9 – 32.
5. Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Reconstruction of mean dynamic topography of the Black Sea for altimetry measurements // *Isv. Atm. Ocean Phys.* 2012. V. 48 (9). pp. 973 – 979.
6. Maxworthy T., Leilich J., Simpson J.E., Meiburg E.H. The propagation of a gravity cur-rent into a linearly stratified fluid // *J. Fluid Mech.* 2002. V. 453. pp. 371 – 394.
7. Oğuz T., Besiktepe S. Observations on the Rim Current structure, CIW formation and transport in the western Black Sea // *Deep-Sea Res.* 1999. Part 1. V. 46. pp. 1733 – 1753.

8. Sizov A.A., Bayankina T.M., Yurovsky A.V. Study of the Process of the Black Sea Upper Layer Mixing in the Zone of the Rim Current Activity in Winter Based on the Drifters Data // Phys. Oceanogr. 2019. V. 26 (3). pp. 260 – 270.



## **ФАЦИАЛЬНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ И ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АКВАТОРИИ КАРСКОГО МОРЯ**

*Р.А. Лукманов, В.Ю. Русаков, Т.Г. Кузьмина, А.П. Борисов*

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, ruluir@gmail.com*

Механизмы седиментации Карского моря, являющегося частью арктического шельфа Евразии, во многом определяются твердым стоком Енисея и Оби – крупных сибирских рек, морфологией дна, гидродинамическими условиями, а также оледенениями и колебанием уровня моря, вызванными ледниковыми и межледниковыми циклами, размывом береговой линии и др. Цель данной работы заключалась в воссоздании современных условий седиментации на основе фациально-генетического анализа и литолого-геохимической типизации донных отложений.

Задачей типизации – основой реконструкции условий осадконакопления, является выделение различных категорий пород и осадков, связанных едиными гранулометрическими (литотип), минералогическими (минеральный тип), геохимическими (хемотип) и иными признаками, которые отражают разные геологические, геохимические, гидрологические и климатические условия их формирования [1, 2].

**Материалы и методы.** Отбор осадков происходил с помощью дночерпателей типа «Океан» и бокс-корера. Глубина отбора поверхностных донных осадков составляла 2 см. В Лаборатории геохимии осадочных пород ГЕОХИ РАН влажный осадок подвергался ультразвуковой обработке для диспергации, далее – с помощью декантации и ситового метода водно-механическому разделению на отдельные фракции.

Для анализа химического состава часть отобранного осадка высушивалась в сушильном шкафу при температуре до 50° С, а затем растиралась вручную в агатовой ступке до однородного порошкообразного состояния. Химический состав изучался в Лаборатории анализа вещества ГЕОХИ РАН с помощью двух методов: рентген-фазового анализа (XRF), благодаря которому определено содержание: Si, Al, Ti, Fe, Mn, K, Ca, Mg, Na, P, Cr, S, V, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, As, Pb + п. п. п., а также масс-спектрометрического анализа с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), в результате которого определено содержание РЗЭ и У. Дальнейшая обработка данных химического анализа проводилась методами математической статистики.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Терригенный осадочный материал характеризуется высокой степенью корреляции между химическим и гранулометрическим составом, в противоположность биогенному и хемогенному [1]. Более грубые осадочные породы содержат большее количество кварцевых зёрен, таким образом, они являются более кремнистыми. Более тонкие осадки, обогащены глинистыми минералами и, таким образом, содержат больше алюминия. Отсюда следует, что выделенные кластеры (типы осадков) на основе анализа их химического состава отражают также и гранулометрический.

Кластерный анализ был произведен на основе факторного, что дало возможность

определить степень подобия между отдельными станциями, которая выражается в евклидовом расстоянии (EP), измеряемым условными единицами (у.е.). Чем выше это расстояние, тем ниже степень подобия и, тем самым, больше различие химического состава между образцами (станциями).

Всего было выделено четыре кластера, первые три (кластеры I, II, III) представляют собой осадочный материал речного стока, который накапливается как внутри эстуарной зоны, так и за ее пределами. Вследствие перехода ламинарного потока в турбулентный внутри эстуарной зоны, скорость водных потоков резко снижается, и значительная часть водной взвеси, переносимая рекой, осажается в зоне изгиба эстуария, что приводит к формированию т.н. иловых банок, локальных возвышенностей на дне. При этом, как горизонтальному переносу, так и активному перемешиванию выносимого за эстуарную зону материала способствует циркуляция поверхностных и придонных течений, что находит своё отражение в результатах кластерного анализа. Более того, подобие между осадками речного выноса довольно существенно ( $EP = 1.7$  у.е.), что усложняет разделение выноса Оби и Енисея в терригенно-мелководно-морской и терригенно-морской зоне осадконакопления [3]. Впрочем, полученные данные указывают на различие между химическим составом “иловых” банок Оби (ст. 5327) и Енисея (ст. 5343). При этом, на сильное влияние речного выноса Оби в Восточно-Новоземельском желобе указывает тот факт, что осадки желоба и обской иловой банки (ст. 5327) проявляют весьма высокую степень подобия ( $EP = 2$  у.е.). Влияние же заливов Новой Земли и енисейского стока в желобе менее ощутимо ( $EP = 3$  у.е.). Подобная ситуация присуща и желобу Воронина, для которого характерно сильное влияние твердого стока Енисея, степень подобия между образцами, отобранными в желобе и в эстуарии Енисея, весьма велика и не превышает 2 у.е. В глубоководной части желобов осаждаются в большей степени тонкие и глинистые осадки (кластеры I и II), вынесенные поверхностными течениями за пределы эстуарной зоны, на склонах же – более грубые, глинистого вещества в которых меньше (кластер III). Таким образом, циркуляция морских течений во многом определяет состав осадков, т.е. их литотип.

Влекомые наносы и реликтовые (плейстоценовые) осадки подобны между собой и отличны от кластеров I-III ( $EP = 5.8$  у.е.), что позволяет отнести их в самостоятельный кластер IV. При этом, внутри этой группы можно выделить две подгруппы, отличающиеся более низкой степенью подобия между друг другом ( $EP = 4.2$  у.е.), и представляющие собой крупнозернистый материал конусов выноса сибирских рек. В первую входят влекомые наносы Енисея (ст. 5344) и Оби (станции 5323 и 5324), а также реликтовые осадки, занимающие большую часть Карского моря, и располагающиеся в северо-восточной части моря и на центральной возвышенности. На схожесть химического состава как между осадками конусов выноса и влекомыми наносами, так и осадками более глубоководной северо-восточной части шельфа свидетельствует довольно существенная степень подобия между ними ( $EP = 1.5$ ). Наряду с этим, плейстоценовые (реликтовые) осадки юго-западной части моря (станции 5297, 5310, 5313 и 5309) по степени подобия относительно далеки, как от плейстоценовых осадков центральной и северо-восточной части моря, так и от влекомых наносов. Данный факт указывает на преимущественное накопление твердого речного стока в центральной и юго-восточной частях моря, в результате чего происходит формирование конусов выноса Оби и Енисея.

**Выводы.** Осевший на дно осадок подвергается влиянию придонных течений, что во многом усложняет модель рассеяния речной и ледниковой взвеси поверхностными течениями. По результатам кластерного анализа можно определить основные зоны



осадконакопления тонких взвесей, для терригенно-эстуарных отложений – это эстуарии Оби и Енисея, для терригенно-мелководно-морских отложений – мелководная область юго-восточного побережья от пролива Вилькицкого до Енисейского залива; и для фоновых терригенно-морских отложений – это глубоководные части желобов: Воронина и Восточно-Новоземельского. При этом, в глубоководных частях желобов механизм аккумуляции осадочного материала полностью контролируется морфологией дна, в отличие от мелководно-морских и эстуарных областей моря, которые в значительной степени подвержены влиянию волн и течений.

*Экспедиционные исследования поддержаны РФФИ (проект № 18-05-00032).*

### **Литература / References:**

1. Фролов В.Т. Литология. М.: Изд-во МГУ, 1992. 336 с.
2. Кузнецов В.Г. Литология. Основы общей (теоретической) литологии. М.: Научный мир, 2011. 360 с.
3. Русаков В.Ю., Кузьмина Т.Г., Левитан М.А., Торопченова Е.С., Жилкина А.В. Некоторые особенности распределения тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Карского моря // Геохимия. 2017. 12. С. 1088–1099.



---

## **СТОК CH<sub>4</sub> И CO ИЗ СТРАТОСФЕРЫ, ДЫРЫ O<sub>3</sub> И УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ПОЖАРЫ**

*П.В. Люшвин<sup>1</sup>, М.О. Буянова<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> ООО «ЛИКО», Москва, lushvin@mail.ru*

*<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет, Москва, tobuianova@mail.ru*

В стратосфере массовые, относительно стабильные, долгоживущие вещества ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $Ar$ ) распределены в соответствии с барометрическим законом - давление падает с высотой по экспоненте. Для многих малых газовых составляющих атмосферы барометрическая оценка распределения частиц по высоте без учета фотохимических и химических реакций не применима. Благодаря последним в распределении концентраций газов появляются аномалии [1].

Энергия солнечной радиации при прохождении земной атмосферы при фотоионизации и фотодиссоциации расходуется на разрыв химических связей в атомах и молекулах и инициирование образования иных форм. Верхняя толща атмосферы ионизирована фотонами с чрезвычайно высокой энергией и длиной волны ультрафиолетового ( $УФ$ ) диапазона. Например, на высотах около 400 км диссоциировано 99% молекул  $O_2$ , на высоте 130 км содержание  $O_2$  и  $O$  одинаково, на меньших высотах содержание молекулярного кислорода превалирует.

Во многих реакциях ионизации в верхней атмосфере происходит массовое тепловыделение (экзотермические реакции), в них поглощается большая часть  $УФ$  излучения, губительного для биоты. Далее следует поглощение радиации молекулярным кислородом. Хотя эта реакция эндотермическая (с поглощением тепла), но энергия кванта превышает затраты на разрыв связей.

С уменьшением высоты значимыми для земной биоты, последовательно, становятся реакции, так называемого озонового цикла. Реакция разложения  $O_3$  экзотермическая. Максимальная скорость образования  $O_3$  на высоте  $\approx 50$  км, а максимум его концентрации на  $\approx 15\div 27$  км. Это различие обусловлено ослаблением с высотой коротковолновой радиации, разрушающей молекулы  $O_2$ . В результате перечисленных процессов теряется от 4 до 6% энергии солнечной радиации, от 5 до 8% разогрева земной атмосферы за счет парниковых газов приходится на превращения  $O_3$ .

Температура атмосферы на 12-20 км  $\approx 170\div 200\text{К}$ , в слое от 20 до 80÷100 км атмосфера теплее на 50-150 К. Температурный максимум находится ниже 40 км, где концентрация атмосферных газов в разы больше. Прогрев нижней стратосферы осуществляется благодаря озоновому циклу и сопутствующих реакций.

Кроме озонового цикла значимым считается и вывод  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$  из стратосферы. Сток  $\text{CH}_4$  в стратосферу, невелик, оценивается величиной  $\sim 10 \pm 5$  млн т в год, что составляет примерно 0,022 от общего стока. Считается, что основное разрушение этих газов в стратосфере происходит при взаимодействии с гидроксидным радикалом ( $\text{OH}$ ). Отметим, что разрушение молекул  $\text{CH}_4$  солнечными лучами (фотолиз), происходящее в верхней стратосфере столь незначительно (слабая монотонная убыль  $\text{CH}_4$  с высотой), что в расчетах им часто пренебрегают. Гидроксил образуется при поглощении молекулой воды кванта света с  $\lambda < 160\text{нм}$ .

В описанном выше стоке явным образом не учитываются энергетически трудные для разрушения молекул процессы самовоспламенения, требуемый энергетический барьер  $400\div 1000$  кДж/моль, температуры свыше 600К.

К тому же они ограничиваются вероятностью столкновения трех возбужденных молекул. Массовые самовозгорания происходят при концентрациях газов  $>5\div 12\%$ . Однако, и самовозгорание начинается с окисления, вступления в реакцию отдельных молекул. В стратосфере энергетический барьер преодолим при бомбардировке молекул фотонами УФ диапазона. Способствует этому и снижение энергетического барьера в слое 6-9 мб, где реакции окисления происходят при значениях температур на десятки градусов Кельвина ниже. Результат массовости окислительных реакций – наличие локальных минимумов в вертикальных распределениях концентраций  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$  – у 25 км и локальный прирост углерода и водяного пара. Расхождений в величинах убыли и прироста сопоставимы в разы и на порядки. Но если учесть временную разницу стока углерода из  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$  в  $\text{CO}_2$  и стока времени жизни последнего в стратосфере, то величины оказываются близки. Аналогично и с водородом - совпадение локального минимума  $\text{CH}_4$  у 25 км с ростом концентрации  $\text{H}_2\text{O}$ . Аналогично отмечается, что водяной пар в стратосфере образуется при разрушении озона.

**Озоновые дыры и природные пожары.** В [2] было показано, что природные возгорания активизируются в зоне разломов земной коры, над магнитными аномалиями и в местах концентраций горючих веществ, например, метана и эфирных масел. Эти возгорания обусловлены сухими грозами, что концентрируются над разломами земной коры. Разрастание пожаров, вне зависимости от их генезиса происходит в местах недостаточного увлажнения над магнитными аномалиями. Связано это с тем, что в конце сезона вегетации над магнитными аномалиями идет более активное развитие лиственных растений – повышенное испарение, за которое дополнительных дождей никто не обещал, листва ускоренно высыхает. Разрастаются возгорания до масштабных пожаров в местах увеличения концентрации метана в нижней тропосфере. Отклонения от тенденции обусловлены отсутствием однозначной связи между активизацией дегазации метана, сухими грозами и сухой погодой. Для минимизации природных пожаров не следует в зонах разломов земной коры складировать сено и солому. Над разломами земной коры и в областях положительных аномалий магнитного поля целесообразно размещать громоотводы (молниеприемники), в торфяных болотах с изоляцией на глубину торфа.

Из вышеприведенного анализа энергетических реакций в стратосфере-тропосфере следует, что в озоновых дырах длинноволновая часть УФ может достигать поверхности Земли. Энергия этих лучей достаточна для самовоспламенения скоплений  $\text{CH}_4$  (эксперименты на кухне с бытовым газом и кварцевой лампой), что впоследствии

может запускать и возгорание скоплений  $CO$ . Пример тому массовые огненные факелы над морями во время подводных извержений (в 1927 г. во время знаменитого Крымского землетрясения над Черным морем, в Каспии и в Темрюкском заливе Азовского моря [2]). Ссылки на приуроченность пожаров к малонаселенным территориям в дни озоновых дыр содержатся в [3]. Наше сопоставление карт аномалий общей концентрации озона с активизацией пожаров и всплеск концентрации  $CH_4$  в нижней тропосфере также фрагментарно указывает на это.

### Литература / References:

1. Люшвин П.В. Сток  $CH_4$  и  $CO$  из стратосферы, дыры  $O_3$  и инфракрасные пожарные лучи // Scientific discussion journal: Praha (Czech Republic). 2020. V. 2 (42). pp. 29–38.
2. Lyushvin P.V. Minimization of natural fires // J. Appl. Sci. 2020. V. 6 (3). pp. 38–58.
3. Сывороткин В.Л. Обреченные гореть. К большинству природных пожаров человек не имеет отношения. РГ. 09.07.2019. <https://rg.ru/2019/07/09/uchenye-k-bolshinstvu-prirodnih-pozharov-chelovek-ne-imeet-otnosheniia.html>



---

## ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ГОЛОЦЕНЕ ПО ЛАВОВЫМ ПОРОДАМ ВУЛКАНОВ АВАЧИНСКИЙ И ТОЛБАЧИК

*В.И. Максимочкин*

*МГУ имени В.М. Ломоносова, Физический факультет, Москва, maxvi@physics.msu.ru*

Большая часть существующих палеомагнитных данных по голоцену Камчатки [1] получены более 30 лет назад. Данные, полученные с использованием современной методики на высокоточном современном оборудовании, остаются фрагментарными [2]. Известно, что палеомагнитные методы могут использоваться не только для определения величины и направления древнего магнитного поля, но и для региональной и межрегиональной корреляции вулканических событий, особенно, когда разрешение изотопных методов датирования недостаточно, например, для относительно молодых вулканических пород.

Работа посвящена определению параметров геомагнитного поля по изверженным породам вулканов Камчатки: Авачинский и Толбачик с целью пополнения данных магнитохронологической шкалы Камчатки для позднего плейстоцена и голоцена и уточнения возраста лавовых потоков вулкана Авачинский.

Для вулкана Авачинский определение величины и направления геомагнитного поля проведено по 10 образцам базальтов (андезито-базальтов) из 3 лавовых потоков. Образцы одного потока отобраны в районе Сухой речки на высоте примерно 1000 м над уровнем моря. Поток относится ориентировочно к извержению 1827 г. [3] образцы второго потока отобраны с гребня сомы. По данным [4] возраст второго потолка более 3500 лет, возраст третьего потока – около 30-50 тысяч лет

В качестве репера при обработке методики определения палеонапряженности был использован образец базальта с вулкана Толбачик извержения 2012. Среднее значение палеонапряженности  $H_{др} = 54.8 \pm 1.3$  мкТл, определенное по 4-м дублям, оказалось завышено всего на 3% по сравнению с величиной главного магнитного поля по модели IGRF-12 ( $BIGRF12 = 53.13$  мкТл) для района вулкана Толбачик, и очень близко к результату определения величины палеонапряженности, полученному на аналогичном образце лавы в [5] ( $H_{др} = 54.6$  мкТл). Качество определений палеонапряженности достаточно высокое:  $q = 13.75 + 40.7$ ,  $DRAT_{max} < 2.77\%$ . Палеоинформативность остаточной намагниченности лавовых пород с вулканов Толбачик и Авачинский и надежность методики Телье определения палеонапряженности были показаны в [6, 7].

Виртуальный магнитный момент Земли  $VDM = (8.9 \pm 0.5) \cdot 10^{22} \text{ A} \cdot \text{м}^2$  рассчитанный по 7 определениям палеонапряженности, удовлетворяющим современным критериям качества, по породам лавового потока №1 вулкана Авачинский оказался довольно близко в величине дипольного магнитного момента Земли  $M = 8.56 \cdot 10^{22} \text{ A} \cdot \text{м}^2$  по данным обсерватории Киото для 1835 г. Отличие координат виртуального геомагнитного полюса (ВГП), определенного нами, от положения северного магнитного полюса, измеренного в 1831 г., составило 10 град по долготе, по широте – оказалось в пределах погрешности определения. Эти данные свидетельствуют, что лавовый поток №1 принадлежит описанному в литературе историческому извержению 1827, а интенсивность магнитного поля Земли за последние 200 лет назад уменьшилась примерно на 11%.

Согласно геологическим данным в конце позднего плейстоцена – начале голоцена в деятельности Авачинского вулкана был период относительного покоя длительностью более 2000 лет, а вулканическая активность возобновилась ~7 250 лет назад [8]. Сравнение полученных нами ВГП и VDM по образцам из 2-го лавового потока с литературными данными вариаций геомагнитного поля за последние 9000 лет показывает, что этот лавовый поток мог образоваться 5 100±200 лет назад. В это время величина магнитного поля Земли была примерно такой-же, как современное поле.

На образцах с лавового потока №3, относящегося к позднеплейстоценовой сумме вулкана Авачинский, получено значение палеонапряженности  $H_{др} = 33 \pm 1.1 \text{ мкТл}$  ( $VADM = 5.7 \cdot 10^{22} \text{ A} \cdot \text{м}^2$ ) примерно в 1.5 раза ниже современного. Согласно [9] старый конус вулкана был разрушен катастрофическим взрывом, который произошел 30–50 тыс. лет назад. В этом интервале магнитное поле Земли характеризовалось низкими значениями в интервале 38–44 тыс. лет назад.

Большое отклонение ВГП от северного географического полюса, позволяет предположить, что это извержение произошло во время экскурса Лашамп (42 тыс. лет назад).

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№ 16-05-00144 и 20-05-00573.*

### **Литература / References:**

1. Кочегура В.В., Зубов А.Г., Брайцева О.А. Магнитостратиграфия голоценовых почвенно-пирокластических образований Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1986. № 6. С. 3–17.
2. Латышев А.В., Кушлевич Д.О., Пономарева В.В., Певзнер М.М., Федюкин И.В. Вековые вариации геомагнитного поля последних 4000 лет, записанные в лавах и пирокластике Северной группы вулканов Камчатки: новые данные // Физ. Земли. 2017. № 5. С. 139–148.
3. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типов и параметров будущих извержений). Часть I (1737–1909 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 13–27.
4. Базанова Л.И., Брайцева О.А., Пузанков М.Ю., Сулержицкий Л.Д. Катастрофические плиннианские извержения начальной фазы формирования молодого конуса вулкана Авачинский (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 20–40.
5. Жидков Г.В., Щербаков В. П и др. Тестовые определения палеонапряженности на исторических лавах Камчатки // Физика Земли. 2017. № 1. С. 171–182.
6. Слепцова Ю.В., Максимочкин В.И., Некрасов А.Н. Палеоинформативность изверженных пород вулканов Камчатки: Авачинский и Толбачик // Матер. 4й Межд. Науы. Шк. Мол. Уч. «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» 2018. М.: ИПМех РАН, 2018. С. 68–70.
7. Максимочкин В.И., Слепцова Ю.В. Надежность методики Телье определения интенсивности геомагнитного поля на исторических лавах Камчатки // Процессы в геосредах. 2019. № 3. С. 345–353
8. Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке (этап 7250–3700 14С лет назад) // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 3–24.
9. Мелекесцев И.В., Литасова С.Н., Сулержицкий Л.Д. О возрасте и масштабе катастрофических извержений



## МЕТОДИКА УТОЧНЕНИЯ МОДЕЛИ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ СКВАЖИНЫ НА ОСНОВЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КЕРНОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*А.А. Мальцев<sup>1,2</sup>, Г.Ю. Щербаков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, [rectorat@spmi.ru](mailto:rectorat@spmi.ru)

<sup>2</sup> Газпромнефть НТЦ, Санкт-Петербург, [ntc\\_odo@gazpromneft-ntc.ru](mailto:ntc_odo@gazpromneft-ntc.ru)

Моделирование кислотной обработки нефтяного или газового пласта-коллектора является одной из наиболее сложных задач в моделировании процессов, происходящих в нефтегазовом коллекторе. Цифровое моделирование процесса кислотной обработки, в частности в условиях терригенных коллекторов, подразумевает решение мультидисциплинарной задачи, которая включает учёт гидродинамических, физико-химических и физико-механических процессов. На сегодня, детальное моделирование процессов, происходящих в призабойной зоне скважины до, после и во время кислотной обработки невозможно с применением аналитических моделей. В то же время современные технологии и математический аппарат позволяют решать численные задачи любой сложности. Здесь точность моделирования зависит от изученности и понимания всех физических и химических процессов, а также наличия эмпирически подтвержденных коэффициентов и зависимостей, и чем сложнее и детальнее модель, тем больше она требует входных эмпирических данных.

Цель работы: применение методики расчётных экспериментов для снижения уровня неопределенности эмпирических коэффициентов в условиях, где определение этих коэффициентов с помощью лабораторных исследований невозможно.

Серьезная проблема заключается в высоких рисках, сопровождающих закачку кислоты в пласт, сложенный песчаниками: вторичные и третичные реакции и неправильный подбор реагентов в кислотном составе могут принести обратный эффект: кольматацию призабойной зоны пласта. Для оценки рентабельности кислотной обработки и учёта рисков необходимо составления дизайна, который включает в себя расчёт оптимального режима и объема закачки кислоты, а также состава кислотной композиции. В основе составления дизайна в первую очередь заложена математическая модель, которая позволяет определить оптимальные параметры для условий каждой скважины.

Таким образом, высокая точность модели и полнота моделирования всех процессов и реакций необходима для повышения эффективности кислотных обработок на скважинах нефтегазовых месторождений, от эффективности их работы (реализации их потенциала) зависит рациональность и рентабельность разработки нефтяных и газовых месторождений, а кислотные обработки являются наиболее доступным методом интенсификации притока. Кроме того, точная модель кислотной обработки позволит использовать современные методы оптимизации с высокой достоверностью и методы вычислительной химии (для понимания свойств которые необходимы кислотному составу в заданных условиях и на основе этого результата уже подбора компонент и их концентрации).

Модель, использованная для симуляции кислотной обработки в этой работе, описана ранее в статьях, посвященных проекту повышения эффективности кислотных

обработок в условиях терригенных коллекторов [1, 2]. Основные возможности модели: моделирование гомогенных и гетерогенных химических реакций с произвольным числом минералов и водорастворимых компонент, возможность моделирования вторичных и третичных реакций, учет гидродинамики нефтяной и водной фаз, где водная фаза и твердая фаза - многокомпонентные, возможность детального моделирования геометрии призабойной зоны, возможность детального моделирования распределения фильтрационно-емкостных свойств и минералогического состава, возможность задания распределения кольматанта и его свойств, учет термодинамики (особенно важно при моделировании химических реакций).

В основе подхода к моделированию лежит методика моделирования геохимических процессов, которая изначально использовалась гидрогеологами и экологами для описания состава подземных вод. Объект моделирования в этих задачах всегда был макромасштабным. Призабойная зона пласта – это как раз то проблемное место, где детальное моделирование предполагает моделирование микро-масштабных объектов. Моделирование гидродинамических процессов и моделирования геологии на нефтегазовых месторождениях тоже относится к воспроизведению макро-объектов. Здесь и возникает ещё ряд проблем, которые были решены при реализации детальной модели кислотной обработки призабойной зоны пласта: моделирование распределения свойств и состава породы в микро-масштабе, невозможность использования моделей локального равновесия при моделировании химических реакций, сильная взаимосвязь гидродинамики и кинетики химических реакций, сильное влияние геометрии вскрытия пласта на реалистичность моделирования, слабая изученность многих эмпирических коэффициентов в составе системы уравнений.

Проведенные ранее фильтрационные исследования на реальном керне показали, что выпадение осадков и неоднородность играют критическую роль в точности воспроизведения процессов с помощью моделирования [3, 4]:

1. Образование каналов (червоточин) возможно не только в карбонатных породах, но в терригенных оно обусловлено не столько кинетикой реакций, сколько неоднородностью минералогического состава и изначального размера капилляров в керне.
2. Образование осадков от реакции плавиковой кислоты с породой (силикагель, кальций фтористый и др.), даже при сильном растворении и образовании высокопроницаемых каналов, может полностью нивелировать эффект (происходит закупорка каналов и порового пространства).

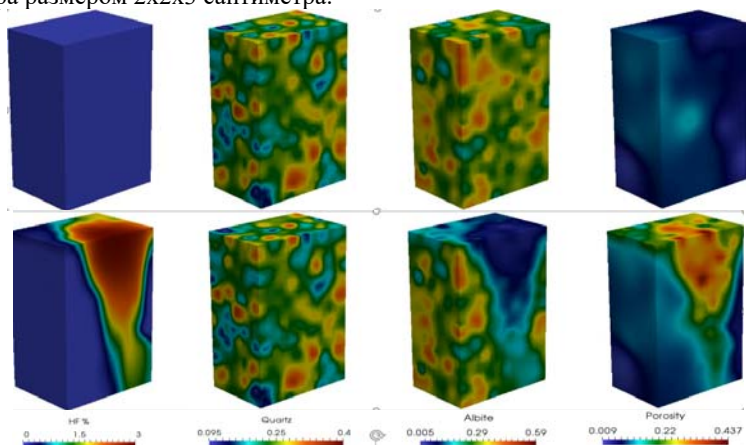
Воспроизведение этих явлений в симуляции методом адаптации на керновый эксперимент позволит повысить точность и снизить неопределенность в эмпирических коэффициентах (определение которых возможно только с использованием большого количества образцов конкретной горной породы, что недоступно в реальных условиях по причинам технологических и экономических ограничений).

Основные задачи выполненные в рамках исследования:

1. Создание детальной модели керна и алгоритмов распределения свойств и минералогического состава на основе литологических исследований;
2. Поведение серии вычислительных экспериментов для определения зависимости конечного распределения свойств (после прокачки кислоты) от начальных (влияние минералогии и фильтрационных свойств на образование червоточин) на керне (рис. 1);
3. Проведение серии вычислительных экспериментов для выявления управляющих параметров математических моделей с наибольшим влиянием, для дальнейшей модификации программы лабораторных исследований
4. Проведение серии вычислений для адаптации модели на фактический эксперимент и уточнения эмпирических коэффициентов

5. Проведение серии экспериментов с ремасштабированием расчётной сетки, что позволило определить коэффициенты в замыкающих зависимостях и полноценно использовать результаты эксперимента на объекте другого масштаба (призобойной зоне пласта)

На рис. 1 слева направо отображены кубы свойств: концентрация кислоты, доля кварца, доля альбита, пористость. Сверху отображено распределение свойств в начале эксперимента, снизу в конце (прокачка 10 поровых объемов). На рисунке видно, что в результате смоделировано образование червоточины в образце песчаной породы-коллектора размером 2x2x3 сантиметра.



*Рисунок 1. Моделирование фильтрационного эксперимента на керне (прокачка кислоты через песчаник и образование высокопроницаемого канала).*

Основные результаты проведенных исследований заключаются в: разработке методики моделирования свойств моделируемой среды; определении эмпирических коэффициентов на основе моделирования ядерного эксперимента и нахождения замыкающих соотношений для снижения дискретизации расчётной сетки, что позволяет снизить время расчётом и эффективно применять методы решения оптимизационных задач.

#### **Литература / References:**

1. Shcherbakov G., Yakovlev A., Groman A., Maltcev A. The development of chemical stimulation method trends in sandstone reservoirs // SPE199321. 2019. DOI 10.2118/199321-MS
2. Shcherbakov G., Maltcev A. The development of the trends in formation damage re-moval technologies in sandstone reservoirs // SPE196992. 2020. DOI 10.2118/196992-MS
3. Fambrough J.D., Newhouse D.P. Comparison of short-core and long-core acid flow testing for matrix acidizing design // Proc. Gas Tech. Symp. 1993. pp. 491–502.
4. Xie T., Li C., Pourmik M., Zhu D., Hill A.D., DeVine C. An experimental and modeling investigation of acid-created channels in sandstone // SPE 94566. 2005. pp. 181–187.





## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ДВУХЪЯРУСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В КАМЕННОЙ СОЛИ

*В.П. Малюков, А.А. Шенилев*

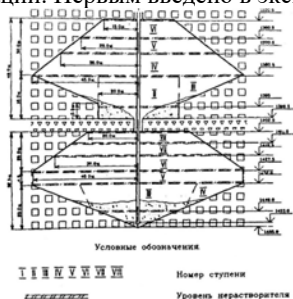
*Российский университет дружбы народов, Москва, srxsjnu@mail.ru*

В Европе и в Северной Америке наблюдается тенденция к увеличению числа ПХГ в структурах каменной соли, которые способны обеспечить высокие темпы закачки и отбора газа. На конец 2018 года в мире эксплуатировались 99 ПХГ в соляных структурах, что составляет 15 % от общего числа ПХГ. Хотя на такие ПХГ приходится всего 8 % от общего объема активного газа, они обеспечивают до 26 % общемирового максимального темпа отбора газа.

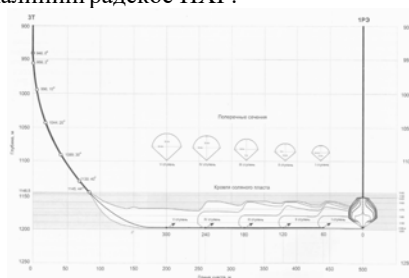
К осенне-зимнему периоду 2019–2020 гг. объем оперативного резерва газа в ПХГ составил 72 232 млрд м<sup>3</sup>, а потенциальная максимальная суточная производительность на начало сезона отбора в Российской Федерации достигла рекордного уровня 843.3 млн м<sup>3</sup> газа. Это на 30.8 млн м<sup>3</sup> выше аналогичного показателя прошлого года.

Применение инновационных технологий сооружения подземных резервуаров в каменной соли предоставляет возможность для проведения работ в особых горно-геологических условиях – пластах ограниченной мощности при строительстве горизонтальных резервуаров и для рационального использования пластов каменной соли большой мощности при строительстве двухъярусных вертикальных резервуаров, тем самым открывая новые перспективы для сооружению подземных резервуаров в ранее недоступных условиях и с большей производственной эффективностью.

Инновационные технологии строительства подземных хранилищ применяются при сооружении Волгоградского подземного хранилища газа на площади Россошинской соляной залежи (рис. 1). Волгоградское ПХГ было введено в эксплуатацию и стало вторым хранилищем газа в структурах каменной соли на территории Российской Федерации. Первым введено в эксплуатацию Калининградское ПХГ.



*Рисунок 1. Схема формирования двухъярусного резервуара на V-й и VI-й ритмопачках Россошинской площади.*



*Рисунок 2. Схема формирования вертикального резервуара на VIII-й ритмопачке Россошинской площади.*

Всего планируется создать 16 выработок-емкостей в V-й, VI-й и VIII-й ритмопачках Россошинской соляной залежи [1], суммарный геометрический объем которых достигнет 4,4 млн м<sup>3</sup> и вместит до 1080 млн м<sup>3</sup> газа, где 820 млн м<sup>3</sup> придется на долю активного газа и 260 млн м<sup>3</sup> – на долю буферного газа.

Проект предусматривает, что из запланированных 16 выработок 14 будут построены в пределах V-й и VI-й ритмопачек в интервале от 1350 м до 1455 м.



Резервуары будут иметь два яруса и вертикальную ориентацию, объем каждой - по 284 тыс. м<sup>3</sup>. В VIII-й ритмопачке, в интервале от 1160 м до 1210 м, планируется размещение двух резервуаров: первый – вертикальный, объемом 100 тыс. м<sup>3</sup>, второй – тоннельного типа с использованием двух скважин (вертикальной и наклонно-горизонтальной), объемом 350 тыс. м<sup>3</sup> (рис. 2) с применением нерастворителя в верхней части выработки для управления формообразованием резервуара [2, 3].

Крупномасштабное моделирование сооружения резервуара тоннельного типа при подаче растворителя с изменением точки его ввода в процессе сооружения впервые было проведено на месторождении каменной соли Ходжа-Мумын [4]. По результатам выполненного физического моделирования была разработана методика и получены аналитические зависимости строительства горизонтальных резервуаров в реальных условиях месторождений каменной соли [5]. Процесс создания горизонтально расположенной выработки-емкости, как и вертикально расположенной выработки, сводится к управлению процессом массоотдачи каменной соли при воздействии растворителя. Процесс массоотдачи каменной соли зависит от параметров каменной соли и гидрогазодинамических структур, образующихся в выработке (в том числе вихревых структур у поверхности каменной соли). Отбор получаемого при строительстве рассола ведется с использованием вертикальной скважины.

Строительство выработки-емкости двухъярусного типа начинается с формирования нижней части хранилища с помощью традиционных технологий. По результатам экспериментального лабораторного моделирования процесса строительства двухъярусных резервуаров была разработана методика и получены аналитические зависимости строительства двухъярусных резервуаров в реальных условиях месторождений каменной соли [6]. Последующее строительство верхней части подземного хранилища осуществляется через отверстия в основной колонне на уровне, на котором будет размещаться выработка-емкость. Перфорация основной колонны осуществляется до ее спуска в скважину или непосредственно перед началом строительства верхней выработки [7].

В настоящее время на Волгоградском ПХГ уже введены в эксплуатацию две выработки-емкости VIII-й ритмопачки – вертикальный резервуар, и единственный в мире, построенный по новой технологии, диаметром около 60 м и длиной около 350 м резервуар тоннельного типа. Резервуары двухъярусного типа находятся в стадии строительства. Газохранилище в Волгоградской области функционирует с максимальной суточной производительностью на начало сезона отбора [8], равной 10.0 млн куб. м; оперативный резерв составляет 135.0 млн м<sup>3</sup>.

Подземное хранение газа в каменной соли является эффективным методом обеспечения надежности газоснабжения, позволяющим решить проблемы по регулированию неравномерности потребления газа и резервированию газоснабжения. Применение инновационных технологий позволяет расширить сферу строительства ПХГ в каменной соли, повысить их производственную эффективность и увеличить темпы наращивания максимальной суточной производительности.

#### **Литература / References:**

1. Литвинов С.А. Геоэкологические аспекты подземного хранения газа в каменной соли: на примере строящегося Волгоградского ПХГ. Диссертация к.г.-м.н., Волгоград, 2002.
2. Поздняков А.Г., Сидоров И.А., Малюков В.П., Мазуров В.А. Способ создания подземной емкости. Авторское свидетельство СССР № 972893, 1980.
3. Хлопцов В. Г. Подземные хранилища природного газа в отложениях каменной соли. Газовая промышленность. 2015. № 9. С. 28-31.
4. Малюков В.П. Образование колец Лизеганга в каменной соли с наночастицами. Горный

информационно-аналитический бюллетень. Научно-технический журнал. Издательство «Горная книга». № 10. 2016. С. 242-248.

5. Поздняков А.Г., Малюков В.П. Сооружение горизонтальных и пологонаклонных подземных камер-хранилищ растворением каменной соли. Транспорт и хранение газа М., 1982. №11 С.7-9
6. Поздняков А.Г., Малюков В.П. Массообмен при создании двухъярусных подземных хранилищ в каменной соли через перфорированную колонну. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, М., 1982. №1 С.6-10
7. Малюков В.П., Казарян В.А. Физико-технические процессы при строительстве подземных хранилищ каменной соли. Международная конференция. ПХГ: надежность и эффективность. 11-13 октября 2006 г. ООО «ВНИИГАЗ», ОАО Газпром. М., 2007 Т. 2, С. 32-49.
8. ПХГ в отложениях каменной соли как эффективный способ решения проблемы пикового газопотребления. Газовая промышленность, №11, 2019, С. 66-67.



## **ОТРЫВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ РАСТВОРА НА КАМЕННУЮ СОЛЬ**

***В.П.Малюков***

*Российский университет дружбы народов, Москва, v.malyukov@mail.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных и натуральных исследований процессов массоотдачи каменной соли при гидродинамическом воздействии раствора. Эксперименты проведены на образцах керна каменной соли из интервала создания подземных выработок-емкостей (каверн) для хранения углеводородов, на кубах соли (модель вертикальных выработок), крупномасштабных горизонтальных (тоннельных) моделях в натуральных условиях.

Рассматриваются различные варианты гидродинамического воздействия раствора на поверхность каменной соли и пограничный слой, связанные с увеличением отрыва пограничного слоя.

Если при обтекании тела область отрыва мала по сравнению с телом, то такой тип течения называется «отрывным течением» при этом происходит «отрыв течения в пограничном слое» или «отрыв пограничного слоя» [1]. Прандтль Л. установил, что необходимым условием отрыва потока от стенки является возрастание давления в направлении течения, т.е. положительный (или обратный) градиент давления в направлении течения [2].

Строительство подземных хранилищ газа (ПХГ) в каменной соли является актуальной задачей по обеспечению надежности поставок газа для различных регионов страны и на экспорт. В январе 2019г. Президент Российской Федерации открыл Калининградское ПХГ в каменной соли, специалистами ООО «Газпром геотехнологии» введено в эксплуатацию Волгоградское ПХГ в горизонтальной выработке-емкости [3].

Процессы массоотдачи каменной соли исследуются при строительстве подземных выработок-емкостей(резервуаров) для хранения углеводородов, комплексном использовании нефтяных и соляных залежей, при добыче рассола на рассолопромыслах [4, 5].

При воздействии раствора на поверхности образца каменной соли и моделей происходит локальный периодический отрыв концентрационного пограничного слоя (проявление положительного градиента давления при обтекании, концентрационный отрыв). У кровли (верхней части выработки) происходит концентрационно-гравитационный отрыв пограничного слоя с большей интенсивностью, чем от других поверхностей.

Для условий Крайнего Севера (Республика Саха, Ботуобинское месторождение) на образцах керна с глубины 457–509 м. определены величины коэффициента массоотдачи каменной соли при низких температурах процесса (+3 °С) В процессе воздействия раствора на образцы соли от кристаллов отрываются тонкие пластинки каменной соли толщиной ~ 1-2 мм и диаметром 2-3 мм (пластинки эллипсоидальные формы, иногда большего размера ~ 5мм). На протяжении всего времени происходит отрыв пластинок соли от поверхности керна с разлетом на расстояние до 5 см. При воздействии раствора отрыв от поверхности каменной соли линзовидных пластинок с острыми краями сопровождается звуком наподобие удара карандашом о деревянную поверхность («стреляние» каменной соли при гидродинамическом воздействии раствора) [6].

Обнаружено, что при этом происходит разрушение приповерхностной части кристалла соли с образованием выемки на поверхности кристалла (увеличение поверхности массоотдачи) и разрыв пограничного слоя отрываемой пластинкой соли с дополнительным локальным отрывом пограничного слоя- происходит разрушение пограничного слоя от поверхности соли.

Открыто явление отрыва пограничного слоя отскакиваемыми от кристаллов пластинками соли – механодинамический отрыв пограничного слоя, в дополнение к концентрационному отрыву пограничного слоя в процессе гидродинамического воздействия раствора. Коэффициент массоотдачи образца с отрывом пластинок соли на 29% больше, чем у образца без отрыва пластинок соли.

Установлено, что при воздействии раствора у поверхностей каменной соли самоорганизуются гидродинамические вихревые структуры. Самоорганизованные структуры образуются при взаимосвязанных гидродинамических и массообменных процессах при взаимодействии самоорганизующихся вихревых структур и поверхностей соли на контуре подземной выработки образуются структуры рельефа поверхности (отпечатки самоорганизующихся гидродинамических вихревых структур).

Визуальное обследование показывает, что в процессе массоотдачи на поверхности кернов, а также на поверхности модели вертикальной выработки в кубе соли и крупномасштабных, горизонтальных моделей в натуральных условиях, образуется последовательность кратеров-образуется поверхность с системой трехмерных вогнутостей.

Возникающие вихревые структуры интенсифицируют массоотдачу. Вихревые движения, образующиеся у поверхности каменной соли в процессе гидродинамического воздействия раствора, рассматриваются, как концентрированные вихри [7]. Образующиеся при воздействии раствора на каменную соль вихревые структуры разрушают пограничный слой, при этом образуется разрывной пограничный слой и увеличивается перемешивание раствора в приконтурной зоне у поверхности соли.

Открыто явление отрыва пограничного слоя вихрями, образующимися у поверхности каменной соли при воздействии раствора- гидродинамический отрыв пограничного слоя в дополнение к концентрационному отрыву пограничного слоя.

При визуальном осмотре керна установлено, что на поверхности кратера, образованного «большим» вихрем, формируется спиралевидный отпечаток под воздействием «меньшего» вихря.

В результате проведения экспериментальных исследований обнаружены явления, характеризующие отрывные процессы и массоотдачу каменной соли при воздействии раствора. Открыто явление отрыва пограничного слоя отскакиваемыми от кристаллов пластинками соли при воздействии раствора при низкой температуре- механодинамический отрыв пограничного слоя. Открыто явление отрыва пограничного слоя вихрями, образующимися у поверхности каменной соли при воздействии раствора

- гидродинамический отрыв пограничного слоя.

Процесс массоотдачи при воздействии раствора на каменную соль рассматриваются, как комплексный механизм отрывов пограничного слоя: концентрационный отрыв, отрыв при выпадении из соли нерастворимых включений, гидродинамический отрыв, механодинамический отрыв, газодинамический отрыв при выделении из каменной соли газа.

### Литература / References:

1. Чжен П. Отрывные течения. М.: Мир, 1972. Т.1. 299 с.
2. Прандтль Л. Механика вязких жидкостей. М. - Л.: Оборонгиз, 1939. Т. 3.
3. Хлопцов В.Г. Подземные хранилища природного газа в отложениях каменной соли // Газовая промышленность. 2015. №9. С. 28–31.
4. Малоков В.П., Казарян В.А. Исследование массопереноса при строительстве подземных хранилищ в каменной соли // Наука и техника в газовой промышленности. 2007. №1(29). С. 64–71.
5. Малоков В.П., Воробьев К.А. Комплексное использование нефтяных и соляных залежей // Сб. матер. 5й Межд. науч. конф.-шк. мол. уч. «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах». Москва: ИПМех РАН, 2019. С. 98–100.
6. Горное дело: Терминологический словарь. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р. (науч. ред.) М.: Издательство «Горная книга», 2016. 635 с.
7. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. М.-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2005. 504 с.



## РЕАКЦИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ АТМОСФЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

*Н.В. Маркова, С.Г. Демьшев, С.С. Нечаев, М.В. Шокуров*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, n.v.markova@mail.ru*

Представлен анализ трансформации глубоководных течений Черного моря при экстремальном атмосферном воздействии – прохождении над морем нетипичного для черноморского региона атмосферного вихря с характеристиками тропического циклона. Атмосферный вихрь характеризовался относительно небольшими горизонтальными размерами (радиус порядка 100 км) и значительной скоростью ветра (до 25–30 м/с). На протяжении 25–29 сентября 2005 г. он локализовался над юго-западной частью Черного моря (рис. 1). Результаты наблюдения и численного моделирования сложившейся атмосферной ситуации («квазитропического циклона») были продемонстрированы в работе [1].

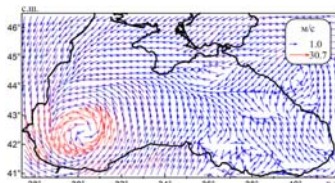


Рисунок 1. «Квазитропический» циклон над Черным морем: поле скорости ветра в период наибольшего развития атмосферного вихря (на 8 ч 0 мин 28.09.2005 г., согласно данным [1]).

Моделирование гидрофизических полей Черного моря в период нахождения «квазитропического циклона» над морской поверхностью и влияние параметризации вертикального турбулентного перемешивания на получаемые результаты были

рассмотрены в работах [2, 3]. Однако изучение особенностей структуры гидрофизических полей на больших глубинах, а также их релаксации после ухода атмосферного циклона за границы моря ранее не проводилось. Особое внимание в работе уделяется изучению реакции на ветровой импульс системы глубоководных течений, поскольку причины их формирования и изменчивости в бассейне Черного моря в целом изучены очень слабо.

Численное моделирование, проведенное в настоящей работе с учетом данных [1] на границе атмосфера-море, позволило воспроизвести трехмерную структуру гидрофизических полей с требуемым разрешением по времени и пространству (на каждый час по времени, 45 z-уровнях по вертикали и с шагом 5 км по горизонтали). Для расчета использована хорошо зарекомендовавшая себя в ряде национальных и международных проектов трехмерная нелинейная вихререзающая модель динамики Черного моря, разработанная в Морском гидрофизическом институте [4, 5]. Численные расчеты динамики морской среды были проведены для периода с 25 сентября по конец октября 2005 г., чтобы описать не только формирование, но и релаксацию особенностей гидрофизических полей в глубинных слоях в течение месяца после ухода атмосферного вихря за пределы моря.

Показано, что отклик Черного моря на экстремальное атмосферное воздействие выражался в формировании циклонического течения в районе локализации атмосферного циклона, которая до 29 сентября была практически неизменна. При этом скорости в стрекне сгенерированного течения на поверхности моря превысили 2 м/с, в центре вихревой структуры происходил подъем более холодных и соленых вод с нижележащих горизонтов, течения вдоль юго-западного побережья Черного моря значительно усилились. Интенсификация течений происходила не только на поверхности, но и под основным пикноклином. В глубинных слоях моря также прослеживалась структура циклонического течения. Скорости на глубоководных горизонтах, как и на поверхности, возросли в несколько раз. Учитывая их низкие климатические значения, не превышающие, как правило, 1–2 см/с, достигнутые в течение трех суток нахождения циклона над морем значения скорости до 15–18 см/с являются весьма существенными (Рис. 2).

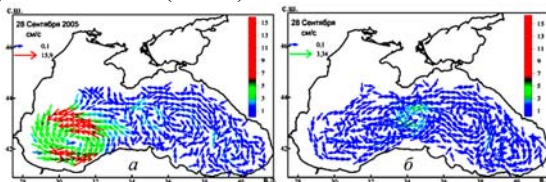


Рисунок 2. Течения на горизонте 1000 м: а – среднесуточные на 28.09.2009, б – климатические.

Диссипация сформированных под воздействием аномального атмосферного циклона особенностей гидрофизических полей проходила различным образом в верхнем (до глубин 200–300 м) и нижележащем слоях. Наибольшее влияние на их эволюцию в верхнем слое оказывали текущие синоптические процессы (регулярного характера), и изменение структуры поля скорости происходило здесь значительно быстрее. Аномалии поля скорости на больших глубинах прослеживались на протяжении всего месяца после ухода «квазитропического» циклона за пределы бассейна, при этом скорости глубоководных течений ослабевали незначительно, и заметного изменения сформировавшейся глубоководной циклонической структуры за счет типичной для региона атмосферной активности не установлено.

*Численный эксперимент по расчету гидрофизических полей Черного моря проведен по теме госзадания № 0827-2020-0002; исследования отклика глубоководных течений выполнены в рамках проекта РФФИ (грант № 18-05-00353 А).*

#### **Литература / References:**

1. Яровая Д.А., Ефимов В.В., Шокуров М.В., и др. Квазитропический циклон над Черным морем: наблюдение и численное моделирование // Мор. гидрофизич. журнал. 2008. Т. 3. С. 41–55.
2. Демьшев С.Г., Маркова Н.В., Отклик гидрофизических полей Черного моря на атмосферный квазитропический циклон 25 – 29 сентября 2005 г. // Геоинформатика. 2010. Т. 1. С. 86–92.
3. Демьшев С.Г., Маркова Н.В., Коротаяев Г.К. Моделирование циркуляции в Черном море в сентябре 2005 г. при различных параметризациях турбулентной диффузии и вязкости по вертикали // Экол. Безоп. Прибр. Шельф. Зон Комплекс. Иссл. Ресурсов Шельфа. 2012. Т. 26(2). С. 8–26.
4. Демьшев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Известия РАН. ФАО. 2012. Т. 48(1). С. 137–149.
5. Демьшев С.Г., Коротаяев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана на сетке С. Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. М.: ИВМ РАН, 1992. С. 163–231.



### **О ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ОКЕАНА**

***Е.В. Мортиков*<sup>1, 2, 3, 4</sup>, *В.А. Оноприенко*<sup>4, 3</sup>, *А.В. Дебольский*<sup>1, 3, 5</sup>, *А.В. Глазунов*<sup>2, 1, 3</sup>,  
*Н.Г. Яковлев*<sup>2, 3, 4</sup>**

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, [evgeny.mortikov@gmail.com](mailto:evgeny.mortikov@gmail.com)

<sup>2</sup> Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

<sup>3</sup> Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва

<sup>4</sup> Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

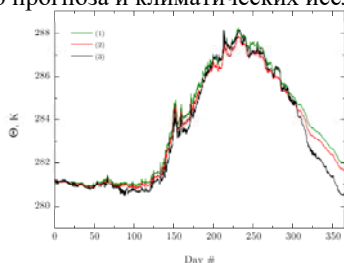
<sup>5</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

Процессы турбулентного перемешивания значимым образом влияют на динамику верхнего слоя океана, процессы переноса примесей и взаимодействие с атмосферой как на суточных, так и на сезонных масштабах. На сегодняшний день важной задачей является уточнение параметризаций турбулентной динамики в крупномасштабных моделях океана. Наибольшего развития на сегодняшний день получили схемы, в которых рассматриваются прогностические уравнения для вторых моментов гидродинамических полей, а старшие моменты, входящие в эти уравнения, параметризуются. Несмотря на то, что такие замыкания были предложены для нейтрально стратифицированной турбулентной динамики более полувека назад [1], они по-прежнему требуют уточнения для стратифицированных течений [2]. При этом из-за вычислительных ограничений в климатических моделях общей циркуляции океана, как правило, используются замыкания первого порядка [3, 4].

В настоящей работе обсуждаются преимущества применения двухпараметрических замыканий, включающих прогностические уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации, по сравнению с замыканиями первого порядка, для описания вертикального перемешивания в океане. Известно, что двухпараметрические схемы, в которых турбулентные коэффициенты рассчитываются из соотношений подобия, позволяют воспроизвести основные особенности изменения температуры и солёности в верхнем слое океана (см., напр. [5, 6]). В [7] было показано, что модели данного типа для устойчиво стратифицированной турбулентности приближенно описывают релаксацию к безразмерным градиентам скорости и скаляров,

согласованным с локальным обобщением теории подобия Мони́на-Обухова. Данный результат позволяет рассмотреть возможность параметризации вертикального перемешивания с помощью простой модели первого порядка, аппроксимирующей стационарные решения двухпараметрической модели. При условии малости времени релаксации такое упрощение представляется достаточным приближением более сложных и вычислительно затратных замыканий. Определение турбулентного масштаба длины в модели первого порядка согласовывалось с данными прямого численного моделирования [8, 9], а турбулентное число Прандтля полагалось постоянным, чтобы упростить сравнение замыканий.

Численные эксперименты по воспроизведению заглупления перемешанного слоя под действием ветра демонстрируют, что расчеты с замыканием первого порядка согласуются с известными результатами прямого численного моделирования и лабораторных экспериментов. С использованием данных измерений в северо-восточной части Тихого океана показано, что модель воспроизводит характерную сезонную изменчивость термической структуры верхнего слоя океана (рис. 1) и является хорошей аппроксимацией решений двухпараметрической схемы. Предложенное замыкание первого порядка может быть использовано в моделях общей циркуляции океана для решения задач оперативного прогноза и климатических исследований.



*Рисунок 1. Изменение приповерхностной температуры для северо-восточной части Тихого океана (50.1° N, 114.9° W, Ocean Station Papa) за 2015 год по данным численного моделирования с помощью предложенного замыкания первого порядка (1), двухпараметрической модели (2) и данным измерений (3).*

*Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 20-05-00776, 18-05-60184 и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1867.2020.5.*

### **Литература / References:**

1. Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1942. Т. 6(1-2). С. 56–58.
2. Cuxart J., Holtstg A., Bearle R., Bazile E., Beljaars A., et al. Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer // Bound.-Layer Meteorol. 2013. V. 118(2). pp. 273–303.
3. Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С., Гусев А.В., Дианский Н.А. и др. Математическое моделирование Земной системы. М.: МАКС Пресс, 2016. 328 с.
4. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // Climate Dyn. 2017. V. 49. pp. 3715–3734.
5. Kantha L.H., Clayson C.A. An improved mixed layer model for geophysical applications // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. pp. 25235–25266.
6. Refray G., Bourdalle-Badie R., Calone C. Modelling turbulent vertical mixing sensitivity using a 1-D version of NEMO // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. pp. 69–86.
7. Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Дебольский А.В., Лыкосов В.Н., Зилитинкевич С.С. О моделировании



- скорости диссипации кинетической энергии турбулентности. Доклады академии наук. 2019. Т. 489(4). С. 82–86.
8. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // Russ. J. Numer. Anal.-sis. Math. Modelling. 2019. Т. 34(2). С. 119–132.
9. Zilitinkevich S., Druzhinin O., Glazunov A., Kadantsev E., Mortikov E., Repina I., Troitskaya Yu. Dissipation rate of turbulent kinetic energy in stably stratified sheared flows // Atm. Chem. Phys. 2019. V. 19. pp. 2489–2496.



## ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ОТВЕРСТИЕМ

*Л.А. Назарова<sup>1,2</sup>, Н.А. Голиков<sup>2,3</sup>, Л.А. Назаров<sup>1</sup>, Г.В. Нестерова<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, lanazarova@ngs.ru*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

<sup>3</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, golikovna@ipgg.sbras.ru*

**Введение.** Оценка фильтрационно-емкостных свойств коллектора по ГИС данным проводится при реализации технологий вскрытия и эксплуатации месторождений углеводородов [1]. Вследствие структурной неоднородности продуктивных интервалов и неравнокомпонентного поля внешних напряжений [2] может сложиться ситуация, когда адекватная инверсия каротажных данных в рамках изотропной гидродинамической модели невозможна, поэтому вводят вертикальную или осевую анизотропию [3]. В качестве физической и методической основы инверсии выступают, как правило, результаты 1D экспериментов на кернах [4]. Однако в случае осевой анизотропии исследуемый объект (околоскважинное пространство) не может быть описан с помощью одномерной модели, поэтому необходимо проводить 2D эксперименты. В статье представлены результаты фильтрационных испытаний неоднородных цилиндрических образцов с центральным отверстием, изготовленных из искусственного геоматериала, а также предложен метод определения зависимости эффективной проницаемости от полярного угла на основе решения коэффициентной обратной задачи.

**Образцы, экспериментальная установка и схема испытаний.** Цилиндрические образцы (высота  $H=110$  мм, радиусы: внешний  $R=75$  мм, центрального канала  $a=4$  мм,) компоновались из 6 частей одинаковой формы (Рис. 1) с разной проницаемостью, изготовленных с использованием калиброванного песка трех фракций (0.5, 1 и 1.5 мм) по технологии, описанной в [5]. Проницаемости, определенные по стандартной методике [6], оказались равными соответственно  $k_0=24$  мД,  $k_1=29$  мД и  $k_2=35$  мД.

Образец **1** в изолирующей эластичной манжете **2** помещался в герметичную металлическую камеру **3** (Рис. 1 и 2), пространство между ними, заполненное крупным песком **4** (фракция 5 мм), обладало высокой проницаемостью (3 Д) и не оказывало существенного влияния на фильтрационные характеристики системы. Через центральное отверстие **5** нагнетался воздух с постоянным давлением  $p_m$ . На боковой поверхности образца в сегменте (угол раствора  $2\beta=30^\circ$ , рис. 1 и 3), положение которого задавалось углом  $\varphi_n$ , в стационарном режиме регистрировался расход  $Q_{mn}$  (расходомер присоединялся через штуцер **6**) с относительной точностью 2%. Результаты измерений при  $p_m=1.05, 1.10, \dots, 1.25$  атм и  $\varphi_n=30^\circ, 45^\circ, \dots, 150^\circ$  приведены в Табл. 1.



Таблица 1. Расход  $Q_{mn}$  (мл/мин) при различных входном давлении  $p_m$  и угле  $\phi_n$ .

m	$p_m$ , атм	$\phi_n$								
		30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°
1	1.05	50	54	59	62	64	64	65	64	61
2	1.10	101	111	120	128	131	132	133	131	124
3	1.15	127	138	150	159	163	165	166	164	155
4	1.20	156	170	185	196	201	203	204	202	190
5	1.25	213	232	252	267	274	277	279	275	260

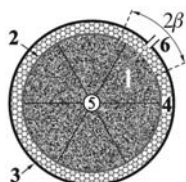


Рисунок 1. Схема эксперимента.



Рисунок 2. Лабораторная установка.

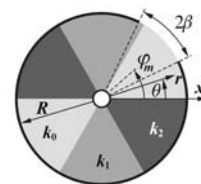


Рисунок 3. Область расчета.

**Модель эксперимента и интерпретация результатов.** В полярной системе координат  $(r, \theta)$  (Рис. 3) эволюция гидродинамических полей в образце описывается системой, включающей [7] уравнение неразрывности, закон Дарси, уравнение состояния:

$$(\omega\rho), t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = -K \nabla p / \eta \quad (2)$$

$$p = p_a \rho / \rho_a \quad (3)$$

где  $\omega$  – пористость, проницаемость  $K$  является кусочно-постоянной функцией от полярного угла  $K(\theta) = k_i$  при  $\theta \in [\pi i/3, \pi(1+i)/3] \cup [\pi(3+i)/3, \pi(4+i)/3]$  ( $i=0,1,2$ ),  $p$  – давление,  $\rho$  и  $\eta$  – плотность и вязкость газа,  $\rho_a$  – плотность газа при атмосферном давлении  $p_a$ ,  $\mathbf{V} = (V_r, V_\theta)$  – скорость фильтрации. Система (1)–(3) сводится к нелинейному параболическому уравнению

$$p, t = b \nabla \cdot (K \rho \nabla p), \quad (4)$$

( $b = \rho_a / (\omega \eta \rho_a)$ ) для которого задаются следующие условия на границе (рис. 3):

$$p(a, \theta, t) = p_m; \quad p(R, \theta, t) = p_a \quad \text{при } |\theta - \phi_n| \leq \beta \quad \text{и} \quad p, r(R, \theta, t) = 0 \quad \text{при } |\theta - \phi_n| > \beta \quad (5)$$

Расход через сектор на боковой поверхности образца, определяемый углом  $\phi_n$ , вычисляется по формуле

$$Q(t) = HR \int_{\phi_n - \beta}^{\phi_n + \beta} V_r(R, \theta, t) d\theta, \quad (6)$$

где радиальная скорость  $V_r$  находится из (2).

Решение системы (4)–(5) осуществлялось конечно-разностным методом перенных направлений [8] на неоднородной по радиусу сетке, структура которой описана в [9]. Следует отметить, что стационарное распределение параметров гидродинамических полей не зависит от величины  $b$ . На рис. 4 представлено распределение стационарного давления в образце при  $\phi_n = 60^\circ$  и  $p_m = 1.25$  атм, демонстрирующее существование застойных зон со сравнительно небольшим

градиентом вдали от сектора, где измеряется расход.

Сформулируем обратную задачу: по измеренным расходам  $Q_{mn}$  (Табл. 1) найти непрерывную функцию, описывающую зависимость эффективной проницаемости от угла  $\theta$ . Предположим, что  $K(\theta) = A + (B - A)\theta/\pi$  ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ) и введем целевую функцию

$$\Psi(A, B) = \sqrt{40 \sum_{m=1}^5 \sum_{n=1}^8 [Q(A, B, p_m, \phi_n) - Q_{mn}]^2} / \sum_{m=1}^5 \sum_{n=1}^8 Q_{mn},$$

где  $Q$  – стационарный расход, рассчитанный по (4)–(6) при некоторых  $A$ ,  $B$ ,  $p_m$  и  $\phi_n$ . Минимум функции  $\Psi$  дает решение обратной задачи – значения коэффициентов  $A$  и  $B$ .

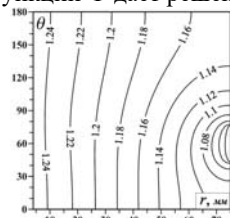


Рисунок 4. Линии уровня  $p/p_a$ .

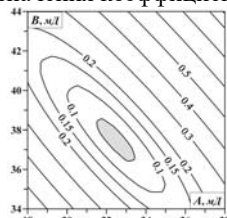


Рисунок 5. Изолинии целевой функции  $\Psi$ .

Рис. 5 демонстрирует линии уровня целевой функции, тоном показана область  $\Psi \leq 0.05$ . Можно видеть, что  $\Psi$  унимодальна, поэтому сформулированная обратная задача однозначно разрешима. С точностью до 10% искомые коэффициенты  $A = 22\text{--}23$  мД и  $B = 37\text{--}38$  мД, что согласуется со значениями эмпирических проницаемостей  $k_i$ .

**Заключение.** Теоретически обоснован и в лабораторных условиях апробирован метод реконструкции эмпирической зависимости, описывающей угловую анизотропию проницаемости, который может быть использован для исследования фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов на полноразмерных кернах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Проект № 19-05-00689) и проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090002-5.*

## Литература / References:

1. Hsu C.S., Robinson P.R. Petroleum Science and Technology. New York: Springer, 2019. 489 p.
2. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Epov M.I., Eltsov I.N. 2013. Evolution of geomechanical and electrohydrodynamic fields in deep well drilling in rocks // J. of Mining Sci. 2019. V. 49(5). pp. 704–714.
3. Zhang Z., Yuan N., Liu C.R. 1-D Inversion of triaxial induction logging in layered anisotropic formation // Progr. Electromagn. Res. B. 2012. V. 44. pp. 383–403.
4. Ahmed T.H. Reservoir Engineering Handbook. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2019. 1524 p.
5. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Голиков Н.А., Нестерова Г.В. Определение зависимости проницаемости геоматериалов от эффективных напряжений по данным лабораторных экспериментов по фильтрации газа в дисковых образцах // Процессы в геосредах. 2019. № 3(21). С. 366–369.
6. ГОСТ 26450.2-85. 2018. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.
7. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 553 с.
8. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. 1963. Ч. 1. 583 с.
9. Nazarova L.A., Nazarov L.A. Evolution of stresses and permeability of fractured-and-porous rock mass around a production well // J. of Mining Sci. 2016. V. 52(3). pp. 424–431.



## САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ЗАМКНУТЫХ РЕАКТОРАХ: ФОРМИРОВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ И ДИАГНОСТИКА

*И.В. Наумов*

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,  
naumov@itp.nsc.ru*

Свойства вихревых течений имеют широкий диапазон технических приложений в энергетическом, теплообменном и технологическом оборудовании различных отраслей промышленности. Эффективное использование огромного потенциала замкнутых вихревых центробежных массо- и теплообменников, одновременно реализующих основные свойства вихревого и циркуляционного движения, в первую очередь определяется прогнозированием и пониманием режимов вихревого движения при варьировании интенсивности и величины закрутки потока [1]. Свойства потоков с сильной закруткой характеризуются наличием нескольких различных типов возмущений, когда происходит смена режимов течения. Одним из ключевых параметров, влияющих на процессы переноса во многих инженерных приложениях, является распад вихревой структуры. Данное явление характеризуется самопроизвольной сменой структуры закрученного течения и образованием зон рециркуляции (vortex breakdown-VB) или вихревых мультиплетных структур [2, 3], что, например, способствует дополнительному перемешиванию ингредиентов и увеличивает выход полезного продукта в хим- и био-реакторах. Сравнительно недавно внимание исследователей привлекли двух-жидкостные вращающиеся течения в связи с развитием вихревых азрированных биореакторов. Кислород из воздуха (верхняя среда) диффундирует через поверхность раздела в нижнюю жидкость, циркуляция которой доставляет кислород к биологической культуре, обеспечивая её быстрый рост. Удобной моделью биореактора является вертикальный цилиндрический контейнер, где движение заполняющей жидкости генерируется вращением одного из торцевых дисков [1-3]. Течения в нём оказались богаты парадоксальными свойствами, которые представляют как практический так и фундаментальный интерес.

В докладе представлен обзор методов оптической диагностики и результатов экспериментальных исследований по управлению неустойчивостью течения и областью распада вихря, генерируемого в закрытом вихревом реакторе выполненных в ИТ СО РАН за последние 15 лет. Рассмотрено влияние геометрии на эволюцию ячеистого течения и переход к нестационарному режиму вихревого движения в закрытом цилиндрическом и полигональном вихревом реакторе [4]. Показаны закономерности формирования ячеистой структуры ограниченного вихревого течения двухкомпонентной несмешиваемой жидкости при условных режимах “жидкое дно” [5] и “жидкая вращающаяся крышка” [6]. Установлен ряд неочевидных интересных особенностей течения такого типа: проскальзывание на границе раздела двухфазной жидкости [7-9], стабилизация вихревого течения при усилении вращения вихревого потока [10] и эффект синхронного изменения ячеистой структуры в верхней и нижней жидкостях (double vortex breakdown – DVB) при соответствующих геометрических и кинематических свойствах используемых жидкостей [11].

**Экспериментальная установка.** Эксперименты проводились в вертикальном цилиндрическом контейнере ( $R = 45$  мм,  $h = h_o + h_{w+} = (1.0 + 1.5) * R$  с вращающимся с угловой скоростью  $\omega$  верхним диском (рис. 1). В качестве рабочей жидкости были использованы подсолнечное масло (o) и водно-глицериновая смесь (w+) с процентным составом глицерина от 30 до 60%, что позволяло регулировать кинематическую вязкость нижней жидкости. При температуре 22.6°C плотности и кинематические вязкости

жидкостей составляли:  $\rho_0 = 914.7 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{w+} = 1070 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu_0 = 49.11 \text{ мм}^2/\text{с}$ ,  $\nu_{w+} = 3 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

Скорость вращения характеризуется числом Рейнольдса,  $Re = \omega R^2/\nu_0$ . Для изучения структуры потока и кинематических характеристик вихревого движения применялись оптические методы бесконтактной диагностики, такие как визуализация течения в центральном сечении цилиндра с помощью лазерного «ножа», толщиной 1 мм и метод цифровой трассерной визуализации (PIV). В качестве светорассеивающих частиц использовались полиамидные частицы нейтральной плавучести со средним диаметром 10 мкм.

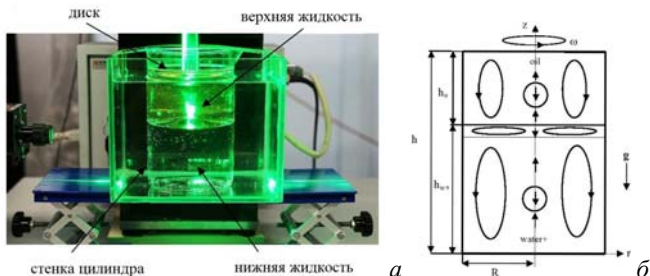


Рисунок 1. Экспериментальная установка (а) и схема вихревого движения жидкости в замкнутом цилиндре.

**Результаты.** В данной работе показано, что с усилением вращения, регулируя высоту верхней жидкости и отношение вязкостей, можно управлять режимами, при которых формируется осевой распад вихря как в верхней и нижней жидкости независимо, так и одновременно (рис. 2).

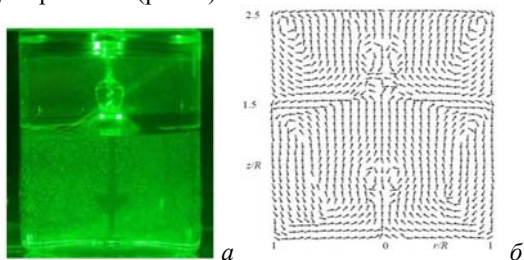


Рисунок 2. Структура течения с двойным распадом вихря при  $Re=750$ . Визуализация (а) и нормированное поле скорости (б) в вертикальном меридиональном сечении.

Установлено что использование контактных сред с разной плотностью и вязкостью оказывает влияние на эволюцию циркуляции в нижней жидкости. При этом  $Re$ , основанном на максимальной азимутальной скорости на данной высоте, непрерывно убывает в каждой жидкости с увеличением расстояния от вращающегося диска, но имеет скачки на поверхностях раздела, изменяясь в  $N$  раз, где  $N$  это отношение (верхней к нижней) вязкостей. На рисунке 2 представлен пример одновременного формирования области формирования ячеистой структуры на оси цилиндра в верхней и нижней жидкости при  $Re=750$ .

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что развитие ячейки циркуляции под границей раздела – пузырьревидного распада вихря в системе двух несмешиваемых жидкостей – происходит так же, как и в случае одной жидкости. С помощью визуализации течения и измерения окружной компоненты скорости выявлены

закономерности формирования вихревого течения более плотной жидкости, расположенной под границей раздела и не имеющей прямого контакта с твердым диском, генерирующем вихревое движение. Данные результаты представляют интерес для развития вихревых технологий, где формирования вихревого движения рабочей жидкости происходит без прямого механического контакта с закручивающим устройством – “жидкая крышка” – с целью обеспечения более мягкого и эффективного перемешивания.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 19-19-00083.*

#### **Литература / References:**

1. Shtern V.N. Cellular Flows. New York: Cambridge University Press, 2018. 573 p.
2. Sørensen J.N., Naumov I.V., Mikkelsen R. Experimental investigation in three-dimensional flow instabilities in a rotating lid-driven cavity // Exp. Fluids. 2006. V. 41(6). pp. 425–440.
3. Sørensen J.N., Naumov I.V., Okulov V.L. Multiple helical modes of vortex breakdown // J. Fluid Mech. 2011. V. 683. pp. 430–441.
4. Naumov I.V., Podolskaya I.Yu. Topology of vortex breakdown in closed polygonal containers // J. Fluid Mech. 2017. V. 280. p. 263–283.
5. Наумов И.В., Кашкарова М.В., Миккельсен Р.Ф. Окулов В.Л. Структура ограниченного закрученного течения при различных фазовых граничных условиях на неподвижном торце цилиндра // Теплофиз. Аэромех. 2020. Т. 27(1). С. 93–98.
6. Naumov I.V., Sharifullin B., Shtern V.N. Vortex breakdown in the lower fluid of a two-fluid swirling flow // Phys. Fluids. 2020. V. 32(1). pp. 014101.
7. Naumov I.V., Glavnij V.G., Sharifullin B., Shtern V.N. Formation of a thin circulation layer in a two-fluid rotating flow // Phys. Rev. Fluids. 2019. V. 4(5). pp. 054702.
8. Naumov I.V., Herrada M.A., Sharifullin B.R., Shtern V.N. Slip at the interface of a two-fluid swirling flow // Phys. Fluids. 2018. V. 30. pp. 074101.
9. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Kravtsova A. Yu., Shtern V.N. Velocity jumps and the Moffatt eddy in two-fluid swirling flows // Exp. Therm. Fluid Sci. 2020. V. 116. pp. 110116.
10. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Tsoy M.A. Experimentally investigating the instability onset in closed polygonal containers // Exp. Fluids. 2019. V. 60. pp. 178.
11. Naumov I.V., Sharifullin B., Tsoy M.A., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid con-fined flow // Phys. Fluids. 2020. V. 32(6). pp. 061706.



---

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ – НА ПРИМЕРЕ ПОЛЬНЕЙ МОРЯ АМУНДСЕНА**

***Е.Э. Никонова, Е.А. Шишин, В.В. Фадеев***

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет*

В [1] нами была предложена процедура оценки значений квантового выхода флуоресценции (КВФ) по данным спутниковой системы MODIS. Также в этой работе было показано, что использование данных спутниковой системы AVHRR, осуществляющей зондирование в микроволновом диапазоне, позволяет уменьшить долю ошибок при расчете КВФ, связанную с вкладом обратного рассеяния от ледяной поверхности в детектируемый сигнал. В данной работе приведены результаты завершающего этапа исследований, включающего более подробный анализ факторов, определяющих точность оценок квантового выхода (в частности, факторов, определяющих форму спектров отражения фитопланктона), и верификацию метода на большем массиве экспедиционных данных.

Как и ранее, верификация осуществлялась на примере обнаружения недостатка железа в клетках фитопланктона путём сравнения эффективности фотосинтеза фитопланктоном (отражаемого значением квантового выхода флуоресценции) в двух полыньях моря Амундсена: ASP (Amundsen Sea Polynya) и PIP (Pine Island Polynya). Многочисленные работы [2, 3] показывают, что фитопланктон полыньи PIP насыщен железом, тогда как фитопланктон ASP испытывает его недостаток, однако вопрос оценки этого эффекта по спутниковым данным не поднимался. Данная работа является развитием этой темы. В частности, было показано, что:

- увеличение значений КВФ связано не только с вкладом обратного рассеяния от ледяной поверхности, как мы считали ранее, но и с ошибками атмосферной коррекции, что подтверждается наблюдаемой сезонной зависимостью значений КВФ; таким образом, абсолютные значения КВФ в первую очередь определяются углами падения солнечного излучения, то есть максимальны при близких к зениту положениях, наблюдающихся в период Летнего Солнцестояния в Южном полушарии (22 декабря);

- необходимо учитывать влияние растворенного органического вещества на значения КВФ, определяемые по спутниковым данным;

- в 2012 г. в полынье ASP наблюдалось увеличение значений КВФ, тогда как в 2017 – нет. Данный результат подтвержден подспутниковыми измерениями.

Ниже кратко излагаются основные результаты исследования факторов, влияющих на величину КВФ, определяемую по спутниковым данным – на примере задачи выявления признаков железной лимитации полыньи ASP. Мы анализировали статистику распределений квантового выхода флуоресценции внутри полыньи ASP и PIP. Железная лимитация полыньи ASP, предположительно, должна была проявиться в увеличенных значениях среднего КВФ в ASP, определенного по данным MODIS, по сравнению с полыньей PIP.

В первую очередь, мы проанализировали факторы, которые влияют на расчет значений КВФ. Как было описано ранее, алгоритм расчета КВФ базируется на следующих продуктах 3 уровня MODIS: сигнале флуоресценции фитопланктона (pFLH), концентрации хлорофилла-а в биомассе фитопланктона (Chl) и коэффициенте диффузного ослабления излучения на 488 нм ( $K_d_{490}$ ), которые, в свою очередь, являются результатами работы полуэмпирических алгоритмов, базирующиеся на спектрах отражения водной поверхности. Был определен вклад каждой из этих величин в итоговый результат определения КВФ.

Распределения КВФ по значениям имеют колоколообразный вид с длинным «хвостом» в области больших значений (Long tail). Нами была исследована природа такой формы распределений. Для этого было проведено сравнение средних спектров отражения, соответствующих 10% самых больших значений КВФ, со средними спектрами отражения для значений в диапазоне 25–75% от максимума. Были выявлены следующие различия спектров отражения водной поверхности, соответствующих этим двум участкам распределения: «выбросы» обладают большим сигналом на 678 нм и при этом малым отношением сигнала на 490 нм к 555 нм. Полоса спектра с максимумом на 678 нм – основа расчета сигнала флуоресценции фитопланктона, а отношение сигнала 490 нм к 555 нм – полоса Core, используемая для расчета концентрации биомассы фитопланктона. То есть «выбросы» характеризуются большим сигналом флуоресценции при малой биомассе, что не может быть объяснено с точки зрения физиологии фитопланктона.

Ранее нами было показано, что завышенные значения сигнала отраженного излучения на 678 нм могут быть связаны с дополнительным отражением от поверхности льда, содержащегося в воде исследуемой акватории. Рассматриваемый

регион содержит большое количество дрейфующего льда, для контроля которого в данной работе нами использовались данные спутника AVHRR, регистрирующего спектры отражения водной поверхности в микроволновом диапазоне. Результат спутникового алгоритма `sea_ice_concentration` определяет долю пикселей, покрытых льдом. Для анализа вклада отражения от поверхности льда мы анализировали статистику КВФ внутри каждой полыньи, то есть по районам с величиной `sea_ice_concentration` менее 0.8.

Однако, этот эффект не может объяснить наличие сезонных зависимостей КВФ по результатам 4 лет измерений, а именно, того, что в начале года регистрируются наибольшие средние значения КВФ, тогда как пик цветения фитопланктона моря Амундсена наблюдается позднее (конец января- первые две недели февраля). Этот эффект объясним проблемами атмосферной коррекции сигналов, отраженных водной поверхностью. Большая часть детектируемого спутником сигнала связана с прохождением излучения через атмосферу, в связи с чем выполняется поправка на атмосферную коррекцию, вычисляемая по красному и инфракрасному спектральным диапазонам. Недооценка атмосферной коррекции приводит к завышенным значениям сигнала в красной области спектра. Применительно к полярному региону ошибки атмосферной коррекции критичны, так как зондирование выполняется под большими углами наблюдения. Таким образом, абсолютные значения КВФ, в первую очередь, определяются углами падения солнечного излучения, то есть максимальны при близких к зениту положениях, наблюдающихся в период Летнего Солнцестояния в Южном полушарии (22 декабря). Тем не менее, этот эффект одинаков для ASP и PIP, что позволяет сравнивать КВФ в них без какой-либо поправки на данный эффект.

Было исследовано влияние растворённого органического вещества (РОВ) на результат определения КВФ по спутниковым данным. Дело в том, что при разработке полумпирических алгоритмов определения КВФ неявно присутствует предположение о среднем соотношении концентраций хлорофилла-а и РОВ. Однако, как было показано [4], в районе южной акватории Тихого океана наблюдается уменьшение (по сравнению с заложенным средним трендом) этого отношения, что приводит к недооценке концентрации хлорофилла-а. Мы оценили величину этого отклонения для конкретных характеристик моря Амундсена. Оказалось, что указанный фактор приводит к занижению концентрации хлорофилла-а, детектируемой спутником, приблизительно в 1.5 раза. Величина коэффициента диффузного отражения при этом изменяется незначительно, на величину около 10%. Такого рода отклонения приводят к увеличению значений КВФ (при КВФ = 5 % увеличение в 1.6 раз). При этом выявленное увеличение КВФ оказалось практически одинаковым для двух изучаемых полыньей, и, следовательно, при сравнительном исследовании не требуется введение поправки к используемому алгоритму расчета КВФ.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-05-00941).*

## **Литература / References:**

1. Nikonova E.E., Shirshin E.A., Fadeev V.V., Gorbunov M.Y. Advanced procedure for estimation of phytoplankton fluorescence quantum yield using remote sensing data: a comparative study of the Amundsen Sea polynyas // Conf. Phys. Math. Model. Earth Envir. Proc. Cham, Springer, 2017.
2. Yager P.L., Sherrell R.M., Stammerjohn S.E., Alderkamp A.-C., Schofield O., Abrahamsen E.P., Arrigo K.R., Bertilsson S., Garay D.L., Guerrero R., Lowry K.E., Moksnes P.-O., Ndungu K., Post A.F., Randall-Goodwin E., Riemann L., Severmann S., Thatje S., van Dijken G.L., Wilson S. ASPIRE: The Amundsen Sea Polynya International Research Expedition // Oceanogr. 2012. V. 25(3). pp. 40–53. DOI 10.5670/oceanog.2012.73

3. Loes J.A.G., et al. Iron from melting glaciers fuels the phytoplankton blooms in Amundsen Sea (Southern Ocean): Iron biogeochemistry // Deep Sea Res. Part II: Topic. Studies Oceanogr. 2012. V. 71. pp. 16–31.
4. Morel A., Gentili B. A simple band ratio technique to quantify the colored dissolved and detrital organic material from ocean color remotely sensed data // Remote Sens. Envir. 2009. 2009. V. 113 (5). pp. 998–1011.



## **ЭФФЕКТ ОБРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ МИНИМАЛЬНОГО ГЛАВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГИДРОРАЗРЫВУ ПЛАСТА**

***Е.В. Новикова, М.А. Тримонова***

*Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва, helenvn97@gmail.com*

В данной работе проводился анализ зависимостей давления от времени, полученных при проведении серии лабораторных экспериментов по образованию и распространению трещины гидроразрыва пласта [1, 2]. Целью исследования было сравнение минимального напряжения, созданного в образце и давления закрытия трещины, которые, согласно стандартной теории, должны совпадать [3].

В ходе работы была проведена серия лабораторных экспериментов по образованию и распространению трещины гидроразрыва. При этом наблюдались две вариации направления распространения получившейся трещины: вертикально (параллельно вертикальной скважине) и горизонтально (перпендикулярно вертикальной скважине). В результате, после обработки данных было выявлено несоответствие рассчитанных величин минимального напряжения в образце и известных из условий лабораторных экспериментов.

В связи с обнаруженным несоответствием было рассмотрено влияние эффекта «обратного напряжения» на распространяющуюся трещину в пороупругой среде. Такое напряжение возникает в следствие повышения порового давления в пласте за счет фильтрации жидкости из образовавшейся трещины гидроразрыва в пласт. Этот эффект приводит к появлению дополнительного напряжения в пласте, которое способствует закрытию трещины гидроразрыва и называется в некоторых источниках back-stress [4–7].

Было выдвинуто предположение о том, что в проведенных экспериментах эффект back-stress повлиял на величину минимального напряжения. Для каждого лабораторного эксперимента было посчитано соответствующее «обратное напряжение». После чего расчет минимальных напряжений по заданным давлениям закрытия трещин [8, 9] с учетом напряжения back-stress привел к снижению разницы между вычисленными значениями минимальных напряжений и предустановленных величин в экспериментах.

Таким образом, в ходе данной работы были вычислены давления закрытия трещины, были проведены сравнения минимальных напряжений в образце, вычисленных с учетом напряжения back-stress, и заданных в лабораторной установке. Было выявлено влияние эффекта «обратного напряжения» на значение минимального напряжения.

*Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 20-35-80018.*

### **Литература / References:**

1. Perkins T., Kern L. Widths of Hydraulic Fractures. 1961.
2. Khristianovic S., Zheltov Y. Formation of Vertical Fractures by Means of Highly Viscous Liquid. 1955.
3. Hickman S.H., Zoback M.D. The Interpretation of Hydraulic Fracturing Pressure-time Data for In Situ Stress Determination. 1983.



4. Kovalyshen Y. Fluid-Driven Fracture in Poroelastic Medium. 2010.
5. Golovin S.V., Baykin A.N. Non-Symmetry of a Hydraulic Fracture due to the Inhomogeneity of the Reservoir. 2016.
6. Golovin S.V., Baykin A.N. Influence of Pore Pressure to the Development of a Hydraulic Fracture in Poroelastic Medium. 2016.
7. Baykin A.N., Golovin S.V. Application of the Fully Coupled Planar 3D Poroelastic Hydraulic Fracturing Model to the Analysis of the Permeability Contrast Impact on Fracture Propagation. 2018.
8. Nordgren R. Propagation of Vertical Hydraulic Fracture. 1972.
9. Nolte K.G. Determination of Fracture Parameters From Fracturing Pressure Decline. 1979.



## **АВИАЦИОННЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЛОКАТОР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ**

**В.Н. Носов<sup>1</sup>, С.Б. Каледин<sup>2</sup>, С.Г. Иванов<sup>1</sup>, Е.А. Зевакин<sup>1</sup>, Л.В. Серебриников<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского, г. Москва, Россия, viktor\_nosov@mail.ru

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, sbkaledin@mail.ru

<sup>3</sup> ООО «ИнЭнерджи», г. Москва, Россия, l.serebrnikov@inenergy.ru

Одной из возможностей исследования процессов, происходящих в толще океана, является их регистрация по проявлениям на морской поверхности.

Разнообразные воздействия природного и антропогенного характера в гидросфере океана приводят к значительным последствиям локального и даже глобального масштаба. Подводные течения, выбросы газов, вулканические процессы приводят к значительным подводным гидродинамическим воздействиям на морскую среду. Антропогенная деятельность в виде перемещения надводных и подводных объектов, строительства подводных сооружений, меняющих характер течений, а также возможные разливы нефтепродуктов существенно воздействуют на состояние морской среды. Большинство названных процессов проявляются на морской поверхности. В частности, меняется характер волнения морской поверхности, появляются зоны с аномальными свойствами в виде сликов или сулоев, вихревых образований, областей с «выглаживанием» поверхности и т.п. Регистрируя эти проявления можно получать данные об их подводном источнике.

Высокую эффективность при решении такой задачи показал дистанционный лазерно-бликовый метод, основанный на сканировании морской поверхности лазерным лучом [1–4]. Известна аналитическая математическая связь интенсивности отражения лазерного излучения («лазерного блика») от морской поверхности с основными параметрами волнения. При использовании данного метода принимаемый сигнал функционально зависит от таких параметров как: энергетическая плотность излучения на морской поверхности, кривизны профиля морской поверхности, чувствительности приемной аппаратуры и апертуры приемного объектива. Случайный профиль морской поверхности можно рассматривать в виде эквивалентной поверхности сферической формы. Это позволяет проводить анализ, используя параметр эквивалентного радиуса кривизны. Информативными параметрами при измерениях также являются углы, под которыми регистрируются лазерные блики и которые определяется уклонами морской поверхности, и временные интервалы между бликами, определяемыми пространственными масштабами волнения. Таким образом, в основе метода лежит набор статистики об отраженных и зарегистрированных сигналах.

Морская поверхность в невозмущенном состоянии имеет некоторые исходные, «фоновые» статистические характеристики. Если на морскую поверхность действует

подводное гидродинамическое возмущение или на ней присутствуют пленки поверхностно активных веществ (ПАВ), то статистические характеристики морской поверхности меняются. Это позволяет обнаруживать такие зоны, а значит и источники воздействия.

В рамках ранее проводимых НИР были разработаны и апробированы различные варианты макетов судовых сканирующих лазерных локаторов, показавшие высокую эффективность при регистрации проявлений различных процессов в толще и на морской поверхности [1–4]. Очевидно, что охват исследуемой морской поверхности в этом случае весьма ограничен. В [5–7] показана возможность использования авиационного носителя для размещения лазерного локатора. Для повышения производительности используемого нами метода и возможности его использования в задачах оперативной океанологии был разработан макет сканирующего лазерного локатора, предназначенного для размещения на борту самолета. Исходными параметрами для разработки являлись – скорость авианосителя 400 км/час, высота полета 300 м.

Проведенный схемотехнический анализ определил: необходимость соосной схемы лазерного осветительного и приемного каналов, мощность лазера, параметры оптической схемы, сканера и фотоприемного устройства. Структурная схема авиационного сканирующего локатора показана на рис. 1. Фотография макета со снятым кожухом и без блоков питания приведена на рис. 2.

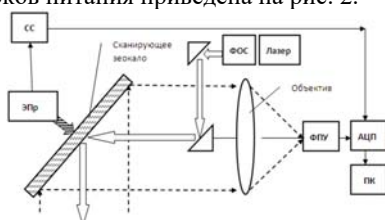


Рисунок 1 Структурно-функциональная схема макета АСЛЛ: ЭПр – электропривод, СС – система синхронизации, ФОС – формирующая оптическая система, ФЭУ – фотоприемное устройство, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер.

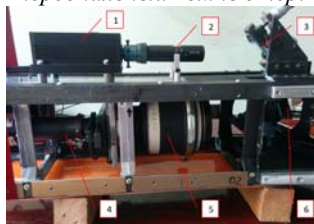


Рисунок 2. Фото макета АСЛЛ со снятой крышкой и без блоков питания: 1 – лазер, 2 – ФОС, 3 – поворотное зеркало, 4 – фотоприемное устройство, 5 – объектив, 6 – зеркало сканера.

В макете АСЛЛ используется возвратно-поступательная схема сканирования с частотой около 28 Гц поперек направления полета в пределах углов  $\pm 10^\circ$  относительно вертикали. Облучение морской поверхности производится лазерным пучком с расходимостью 0.5 мрад мощностью около 2.5 Вт на длине волны 532 нм. Бликовое излучение принимается объективом с апертурой диаметром 100 мм в пределах мгновенного углового поля 0.9 мрад и регистрируется фотоприемным устройством на основе ФЭУ-114. Величину усиления ФЭУ можно регулировать в процессе полета в

зависимости от внешних условий. Регистрация поступающей информации производится в цифровом виде и обрабатывается по специальной программе бортовым компьютером. Разработанный нами макет АСЛЛ обладает следующими характеристиками: динамический диапазон амплитуд принимаемых блоковых сигналов не хуже 40 дБ, диапазон регистрируемых эквивалентных радиусов кривизны морской поверхности в пределах 25 мм – 2 500 мм, уклоны волн в пределах  $\pm 10^\circ$ , пространственное разрешение с высоты 300 м не хуже 0.15 м.

Для расширения возможности применения лазерно-оптического метода для задач оперативной океанологии целесообразно разработать подобные макеты АСЛЛ для других типов авиационных носителей. Наиболее перспективным вариантом, по нашему мнению, является использование беспилотных летательных аппаратов (дронов).

Пробные натурные испытания макета АСЛЛ показали хорошее (близкое) соответствие расчетным параметрам локатора и возможность получения информации об изменениях состояния морской поверхности в зависимости от различных гидрометеорологических воздействий, что, по нашему мнению, предоставляет широкие возможности использования локатора для оперативных океанологических исследований.

### Литература / References:

1. Nosov V.N., Ivanov S.G., Timonin V.I., Kaledin S.B. Anisotropy study of statistical characteristics of wind waves under the influence of hydrodynamic perturbations in laser-reflective method // Proc. in GeoMedia. Springer Geology. 2020. V. I. pp. 93–100.
2. Nosov V.N., Kaledin S. B., Ivanov S.G., Timonin V.I. Remote Tracking to Monitor Ship Tracks at or near the Water Surface // Optics Spectrosc. 2019. V. 127. pp. 669–674.
3. Носов В.Н., Иванов С.Г., Каледин С.Б., Савин А.С. Регистрация проявления глубинных процессов в приповерхностных слоях морской воды и атмосферы // Процессы в геосредах. 2017. № 2(11). С. 522–528.
4. Есипов И.Б., Наутольных К.А., Носов В.Н., Пашин С.Ю. Измерение вероятностного распределения радиусов кривизны морской поверхности // Изв. АН СССР. ФАО. 1986. Т. 22. С. 1115–1117.
5. Бялко А.В., Локк Я.Ф., Пелевин В.И. Исследование неоднородностей ветрового волнения с борта вертолета. Исследование изменчивости оптических свойств Балтийского моря. Озмидов Р.В. (ред.) Таллин, 1983. С. 34–44.
6. Bufton J.L., Hoge F.E., Swift R.N. Airborn measurements of laser backscatter from the ocean surface // Appl. Opt. 1983. V. 22. pp. 2603–2618.
7. Бункин Ф.В., Воляк К.И., Маляровский А.И. и др. Самолетные измерения морского волнения по зеркальным отражениям луча непрерывного лазера // Докл АН СССР. 1985. Т. 281. С. 1441–1445.



## ЭФФЕКТ КАЙЗЕРА ПРИ ДВУХ- И ТРЕХОСНОМ НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ СЖАТИИ ПЕСЧАНИКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ЭЛЛИПСОИДА ЛАМЕ

*И.А. Пантелеев<sup>1</sup>, В.А Мубассарова<sup>1</sup>, К.Б. Устинов<sup>2</sup>, А.В. Зайцев<sup>3</sup>, Ю.Ф. Коваленко<sup>2</sup>,  
В.И. Карев<sup>2</sup>, Н.И. Шевцов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, [ria@icmm.ru](mailto:ria@icmm.ru)

<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, [wikarev@ipmnet.ru](mailto:wikarev@ipmnet.ru)

<sup>3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, [a-zaitsev@mail.ru](mailto:a-zaitsev@mail.ru)

Эффект Кайзера (эффект "памяти"), заключающийся в отсутствии сигналов акустической эмиссии (АЭ) при циклическом деформировании материала до тех пор,

пока не будет достигнут максимальный уровень напряжения предыдущего цикла, известен с середины прошлого века [1].

Экспериментальные исследования проведены на образцах песчаника Верхнекамского региона. Образцы изготавливались кубической формы с размером грани 40 мм и подвергались предварительной шлифовке для обеспечения требуемого уровня параллельности граней. Механические испытания проводились в лаборатории геомеханики Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН на уникальном испытательном стенде для физического моделирования деформационных процессов в горных породах в сложных геологических условиях – Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) [2–7]. Данный стенд позволяет реализовывать независимое нагружение материала по трем ортогональным осям с контролем прикладываемого усилия и/или перемещения благодаря оригинальной кинематической схеме, позволяющей нажимным плитам сближаться в трех направлениях, не создавая препятствия друг другу. Для регистрации АЭ в процессе деформирования была использована многоканальная система Amsy-6 Vallén (Германия) с широкополосными пьезопреобразователями М-31 (Fujitsu, Япония), имеющими рабочий диапазон 300-800 кГц, и 2SMEG-P (Deci, США) с рабочим диапазоном 200-2000 кГц. Датчики М-31 крепились с помощью цианокрилатного клея на свободной поверхности образцов при двухосных испытаниях, тогда как при трехосном нагружении 2SMEG-P устанавливались на нажимные плиты через вакуумную смазку. Ранее в работе [4] было показано, что интегральные и дифференциальные характеристики АЭ, зарегистрированной датчиками, установленными на нажимных плитах ИСТНН и непосредственно на свободной грани образца, подобны. Этот позволило провести на ИСТНН экспериментальные исследования закономерностей деформирования и разрушения горных пород при трехосном непропорциональном нагружении по траекториям в виде многозвенных ломаных с непрерывной записью сигналов АЭ.

Для исследования закономерностей проявления эффекта Кайзера при циклическом трехосном непропорциональном сжатии песчаника были разработаны и реализованы две различных программы. В рамках первой программы образцы песчаника подвергались последовательно четырем циклам активного двухосного сжатия и разгрузки. В первом цикле выполнялось активное пропорциональное сжатие в направлении осей  $X$  и  $Y$  до напряжений  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 14$  МПа с последующей разгрузкой до 7 МПа (рис. 1, а). Во втором цикле активное пропорциональное сжатие вдоль тех же осей осуществлялось до напряжений  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 24$  МПа с последующей разгрузкой до 7 МПа. В третьем и четвертом циклах было реализовано двухосное непропорциональное нагружение. Активное сжатие выполнялось только в одном из направлений с удержанием постоянного напряжения по второму: в направлении оси  $X$  до  $\sigma_{xx} = 34.5$  МПа при  $\sigma_{yy} = 7$  МПа (третий цикл) и в направлении оси  $Y$  до  $\sigma_{yy} = 49$  МПа при  $\sigma_{xx} = 7$  МПа (четвертый цикл). В течение всего эксперимента грань образца, перпендикулярная оси  $Z$ , оставалась свободной от напряжений. Скорость активного нагружения и разгрузки в каждом из четырех циклов была постоянна и равна 34.6 кПа/с. Разработанная программа нагружения позволила варьировать размеры, форму и ориентацию эллипсоида Ламе: в первых двух циклах эллипсоид напряжений выроден в окружность, в третьем и четвертом – в эллипс. Кроме того, в четвертом цикле эллипсоид напряжений развернут относительно своего положения в третьем цикле на  $\pi/2$ .

Вторая программа циклического трехосного непропорционального нагружения песчаника предполагала всестороннее сжатие до напряжения 10 МПа и последующую

реализацию трех пар циклов активного нагружения и разгрузки. В первой паре циклов выполнялось активное сжатие в направлении оси  $X$  до напряжения  $\sigma_{xx} = 60$  МПа с последующей разгрузкой до  $\sigma_{xx} = 10$  МПа при удерживании постоянными напряжений по двум другим осям  $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 10$  МПа (рис. 1, б). Во втором цикле продолжалось активное сжатие в направлении оси  $X$  до  $\sigma_{xx} = 80$  МПа с последующей разгрузкой до 10 МПа при удерживании напряжений по двум другим осям на постоянном уровне  $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 10$  МПа. Вторая и третья пара циклов предполагала активное сжатие до 60 и 80 МПа и разгрузку до 10 МПа в направлении осей  $Y$  и  $Z$  с контролем постоянства напряжений в двух других направлениях ( $X$  и  $Z$ ,  $X$  и  $Y$  соответственно затем) на уровне 10 МПа. Скорость активного нагружения и разгрузки в каждом из шести циклов была постоянна и равна 31 кПа/с. В результате реализации этой программы дважды изменялась ориентация главных напряжений: произошел разворот эллипсоида напряжений: с  $\sigma_1 = \sigma_{xx} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$  на  $\sigma_1 = \sigma_{yy} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{zz}$  (первый), с  $\sigma_1 = \sigma_{yy} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{zz}$  на  $\sigma_1 = \sigma_{zz} > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{xx} = \sigma_{yy}$  (второй разворот).

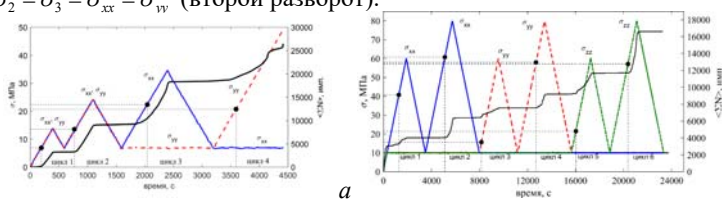


Рисунок 1. Программы двух- (а) и трехосного (б) непропорционального нагружения песчаника и средний суммарный счет АЭ. Точки - моменты активации АЭ.

Для анализа данных АЭ при циклическом двух- и трехосном непропорциональном сжатии песчаника, в скользящем временном окне проводилось осреднение длительностью 1 сек. данных о количестве зарегистрированных импульсов АЭ каждым из трех датчиков. На рис. 1 представлены совмещенные программы нагружения и средний суммарный счет АЭ.

В случае последовательного пропорционального двухосного сжатия во втором цикле наблюдается эффект Кайзера при напряжении, точно соответствующем максимальному напряжению первого цикла. При дальнейшем непропорциональном сжатии, которое сопровождается вращением эллипсоида Ламе, также наблюдается эффект Кайзера, но при меньшем уровне напряжений. Это вызвано развитием трещиноватости, ориентированной преимущественно перпендикулярно вертикальной оси  $Z$  – направлению минимального главного напряжения. Полученные результаты показывают, что дефектная подсистема, созданная в образце песчаника в результате первых двух циклов, остается «чувствительной» к последующему активному нагружению отдельно в каждом из двух направлений: оси  $X$  (третий цикл) и оси  $Y$  (четвертый цикл).

При трехосном неравнокомпонентном сжатии с последовательным вращением эллипсоида напряжений в каждой паре циклов наблюдается эффект Кайзера при напряжениях активизации АЭ близкими к максимальным по модулю значения главным напряжений в предыдущем цикле [8]. Однако при смене направления действия максимального главного напряжения проявления эффекта Кайзера не были зарегистрированы. В третьем и пятом циклах (первые циклы нагружения в направлении осей  $Y$  и  $Z$ ) активизация АЭ наступала при  $\sigma_{yy} = 15.7$  МПа и  $\sigma_{zz} = 21.5$  МПа соответственно.

Таким образом, реализация на ИСТНН разработанных программ двух- и трехосного непропорционального циклического сжатия песчаника Верхнекамского

региона позволила установить, что проявление эффекта Кайзера зависит от характера изменения размера, формы и ориентации эллипсоида Ламе относительно предыдущего цикла. Эффект Кайзера наблюдается в случае, если материал ранее уже был подвержен активному нагружению, соответствующему заданной ориентации эллипсоида напряжений. Степень проявления указанного эффекта определяется характером изменением формы этого эллипсоида. Обнаружено, что постоянство формы эллипсоида Ламе приводит к появлению эффекта Кайзера при напряжениях, соответствующих максимальным по модулю значениям главных напряжений в предыдущих циклах. Изменение формы эллипсоида Ламе от цикла к циклу является одной из причин снижения абсолютной величины напряжения активизации АЭ.

*Авторы благодарят академика РАН А. А. Баряха (ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь) за активное участие в обсуждении плана работ и полученных результатов.*

*Экспериментальные исследования двухосного непропорционального сжатия песчаника выполнены в рамках государственного задания АААА-А19-119013090021-5, трехосного непропорционального сжатия – государственного задания Минобрнауки РФ FSNM–2020–0027 на выполнение фундаментальных научных исследований на 2020 г. и плановый период 2021 и 2022 гг.*

### **Литература / References:**

1. Kaiser J. An investigation into the occurrence of noises in tensile tests or a study of acoustic phenomena in tensile tests. Ph.D. Thes. Tech. Hosch. Munchen, Munich, 1950.
2. Карев В.И., Климов Д.М., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. О разрушении осадочных горных пород в условиях сложного трехосного напряженного состояния // Изв. РАН. МТТ. 2016. № 5. С. 15–21.
3. Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B. Modeling deformation and failure of anisotropic rocks nearby a horizontal well // J. Min. Sci. 2017. V. 53 (3). pp. 425–433.
4. Пантелеев И.А., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Зайцев А.В., Карев В.И., Устинов К.Б., Шевцов Н.И. Эволюция поврежденности при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии // Физич. Мезомех. 2019. Т. 22 (4). pp. 56–63.
5. Сидорин Ю.В., Устинов К.Б., Сиротин А.А., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И., Зайцев А.В., Журавлев А.Б. Экспериментальное исследование деформирования горных пород в условиях плоской деформации и плоского напряженного состояния // Процессы в геосредах. 2016. №2 (6). С. 148–155.
6. Шевцов Н.И., Зайцев А.В., Пантелеев И.А. Исследование связи напряженно-деформированного состояния горных пород с потоком акустической эмиссии на испытательной системе трехосного независимого нагружения // Процессы в геосредах. 2019. №1(19). С. 129–136.
7. Shevtsov N., Zaitsev A., Pantelev I. Deformation and destruction of rocks on the true triaxial loading system with continuous acoustic emission registration Physical and mathematical modeling of Earth and environment processes // 4th Int. Sci. School for Young Sci. IPMech RAS, 2019. Karev V.I., Klimov D., Pokazeev K. (eds.). Cham: Springer Nature, 2019. pp. 424–432.
8. Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Зайцев А.В., Шевцов Н.И., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Эффект Кайзера при трехосном сжатии песчаника с последовательным вращением эллипсоида заданных напряжений // ФТПРПИ. 2020. №3. С. 47–55.



## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЕКТОРНОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОДОВ ПО ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

***В.П. Пахненко***

*Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН, Москва, terkin95@mail.ru*

Утечка продуктов переработки нефти, топлива или других углеводородов – всегда серьезная экологическая проблема, последствия которой сложно устранить. Ликвидация разливов нефти требует больших затрат и усилий в любых обстоятельствах. Вследствие постоянного роста объемов добычи нефти, а также совершенствования технологий их добычи возрастает и опасность экологических катастроф, поэтому крайне важно исследовать методы эффективной ликвидации последвий подобных катастроф.

Одним из способов, который может помочь эффективнее исследовать распространение углеводородов по поверхности воды – применение средств векторной графики для обработки результатов экспериментов. Его применение уже хорошо продемонстрировало себя для уточнения картины течения и измерения скорости вращения свободной поверхности жидкости в составном вихре, где были проведены серии экспериментов, в которых в качестве индикаторов использованы одновременно твердые и растворимые маркеры.

Подобные эксперименты, по регистрации перемещения подкрашенного маркера или различных углеводородов на поверхности течения требует обработки большого объема данных. Движения примеси вдоль свободной поверхности воды фиксировалось с помощью видеокамеры, соответственно исходными данными для обработки являлись видеофайлы в формате mp4. Такой видео файл, конвертированный с помощью покадровой нарезки, превращается в набор фотографий. При этом видеозапись обычного эксперимента длиной в несколько минут будет превращаться в массив из 1600 изображений. Ручная обработка такого количества изображений требует значительных временных затрат. Поэтому, объем исходных данных и время, затрачиваемое на их обработку, в значительной мере влияют на эффективность проводимой экспериментальной работы [1].

При извлечении отдельного кадра из исходной видеозаписи он будет представлять собой растровое изображение. Далее при преобразовании этого снимка в векторное представление, он станет представлять собой текстовый файл, содержащий набор команд, по которым данное изображение отображается на экране. Соответственно у данного подхода есть некоторые плюсы: такой переход позволяет существенным образом сократить объем исходной информации, сама задача обработки текстовых файлов конечно проще, чем задача обработки файлов с двумерными растровыми изображениями.

Оценка параметров перемещения подкрашивающей примеси, углеводородов или твердотельных маркеров вдоль поверхности жидкости на основе растровых изображений требует применения теории распознавания образов [2]. Современные методы векторной графики являются результатом многолетнего применения теории распознавания образов к решению таких задач при создании картографирования, геоинформационных систем и полиграфии [3].

Для преобразования растровых изображений в векторное представление, был использован программный продукт Potrace [4], позволяющий эффективно, а главное точно выполнять поставленные задачи. В его основе лежит алгоритм аппроксимации, основанный на построении кривых Безье [5, 6]. Соответственно из исходных растровых



изображений получаются файлы, содержащие значения параметров этих кривых.

На рис. 1 приведен пример использования векторной графики для обработки натурального эксперимента. При помощи программы считывалась траектория маркера в каждый момент времени, все координаты в текстовом формате записывались в один файл, соответственно на (рис. 1, б) изображено графическое представление данного файла.

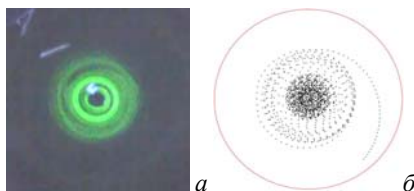


Рисунок 1. Пример использования векторной графики: а) кадр из видеозаписи эксперимента, б) графическое представление результатов обработки.

Была подтверждена точность и эффективность использования средств векторной графики для обработки результатов экспериментов с твердотельными маркерами и подкрашивающей примесью. Это свидетельствует о том, что при помощи данного метода можно также исследовать и различные параметры распространения масла, нефтяных продуктов и прочих углеводородных продуктов. При помощи данного метода возможно будет эффективно и точно посчитать изменение площади загрязняющего пятна, скорость и направление распространения углеводородного пятна.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования*

*РФ № 13.1902.21.0018 "Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России".*

#### **Литература / References:**

1. Шевцов Н.И., Степанова Е.В. Применение метода фотометрии изображений в некоторых задачах гидродинамики // ВМУ. Сер. 3. Физ. Астрон. 2015. № 3. С. 44–48.
2. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. 411 с.
3. Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике М.: Недра, 1985. 300 с.
4. POTRACE <http://potrace.sourceforge.net>
5. W3C: Стандарт Rex-SVG11–20110816 Scalable Vector Graphics (SVG)
6. Eisenberg D.J. SVG Essentials, 2nd Edition. O'Reilly Media. 2014. 366 p.



---

## **ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСРЕДАХ**

**С.И. Перегудин<sup>1</sup>, Э.С. Перегудина<sup>2</sup>, С.Е. Холодова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, [s.peregudin@spbu.ru](mailto:s.peregudin@spbu.ru)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, [ehllina-peregudina@yandex.ru](mailto:ehllina-peregudina@yandex.ru)

<sup>3</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, [kholodovase@yandex.ru](mailto:kholodovase@yandex.ru)

Вопросам о крупномасштабных движениях электропроводной жидкости посвящен ряд работ, в которых рассматривалась модель, построенная в приближении быстрого вращения. В рамках этой теории в уравнениях движения пренебрегается силой инерции. В результате отфильтровываются инерциальные волны, волны Альфвена и



волны Россби. Кроме того, в пределе быстрого вращения скорость определяется неоднозначно, а с точностью до слагаемого, представляющего собой геострофическую скорость. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что геострофическая скорость не удовлетворяет магнитогеострофическому уравнению. Для преодоления указанных трудностей искусственно привлекаются вязкие силы и производится пренебрежение вязкостью, в случаях, если это допустимо. Ранее исследовалась задача о крупномасштабном движении электропроводной жидкости в слое между плоскостями в магнитогеострофическом приближении с учетом вязких сил. В представленном исследовании предполагается, что границы слоя не являются плоскими, а представляют собой по-верхности, изменяющиеся в пространстве и во времени; производится решение полной системы магнитогиродинамических уравнений, кроме того, в уравнениях движения учитываются инерционные силы, а в уравнениях индукции магнитного поля диффузионные члены имеют тот же порядок, что и конвективные, то есть, исследуемая задача решается при произвольных значениях магнитного числа Рейнольдса. С помощью введения вспомогательных функций систему уравнений в частных производных удастся редуцировать к одному скалярному уравнению, для которого представляется точное решение, позволяющее сделать вывод о влиянии эффектов диффузии магнитного поля на его генерацию и поддержание в отсутствие внешнего поля.

Результаты выполненного исследования могут быть использованы в астрофизике и геофизике, в частности, при изучении процессов, происходящем в жидком ядре Земли и недрах звезд, а также при рассмотрении процессов самовозбуждения магнитогиродинамического динамо в относительно больших массах жидкого металла и технических устройствах, например, в технологических процессах, использующих напорные камеры реактора на быстрых нейтронах.

Изначально смоделированное физическое явление может быть представлено в виде замкнутой системы уравнений в частных производных с соответствующими граничными условиями [1]. Редуцирование этой системы к одному скалярному уравнению [2] позволяет произвести качественный анализ, а именно, утверждать, что в случае замороженного магнитного поля учтенные граничные эффекты могут способствовать нарушению устойчивости, а следовательно, и росту магнитного поля. В то же время, управляя значениями затравочного магнитного поля, можно наблюдать установившийся во времени процесс, то есть, индуцированное магнитное поле сможет существовать сколь угодно длительное время. Причем, при отсутствии внешнего магнитного поля, при соответствующем соотношении определяющих параметров может сохраняться как установившийся волновой режим, так и возникать неустойчивый волновой режим, так и затухание волнового процесса.

#### **Литература / References:**

1. Холодова С.Е. Волновые движения в стратифицированной электропроводной вращающейся жидкости. // Журн. Вычисл. Матем. Матем. Физ. 2009. Т. 49 (5). С. 916–922.
2. Габов С.А., Свешников А.Г. Линейные задачи нестационарных внутренних волн. М.: Наука, 1990. 344 с.



## О ЧЕМ ПРЕДУПРЕЖДАЮТ ФАКТОРЫ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

*С.П. Перов<sup>1</sup>, К.В. Показеев<sup>2</sup>, Н.С. Сидоренков<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup> Центральная Аэрологическая Обсерватория, Москва*

*<sup>2</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет*

*<sup>3</sup> Гидрометцентр России, Москва, sperov35@mail.ru*

В [1] авторы пришли к предварительному выводу о возможном начале очередной перестройки климатической системы за счет действия природных факторов и к изменению циркуляций в атмосфере и океане – началу возможного глобального похолодания. При рассмотрении современного состояния климатической системы превалирует т.н. парниковая гипотеза, на основании которой принимаются самые ответственные политические и экономические решения. Такой подход к описанию самой сложной из известных физике систем - климатической системы планеты Земля, является некорректным. Предложен физически обоснованный подход к этому сложнейшему объекту как к открытой термодинамической системе с потоками энергии, массы, энтропии, аналогичный впервые предложенному [2] для строгого теоретического описания преобразования энергии электромагнитного (э/м) излучения в люминисцентное свечение. Однако для климатической системы Земли, как суммы подсистем, необходимо также учитывать существующие в пространстве физические поля, в первую очередь гравитационное, играющее определяющую роль в эволюции климата в широком временном интервале от десятков до сотен тысяч лет [3-5]. Подробно рассмотрен начальный период современного «потепления» (1850–1890 гг.). Впервые проанализирована самая мощная в современной истории геомагнитная буря 1859 г. («Событие Каррингтона»). В частности, для этого периода рассчитаны параметры лунно-солнечных гравитационных приливов, подтверждающие синхронизацию этих событий и их резонансный характер.

Как известно, самая мощная магнитная буря в истории наблюдений, более известная как «событие Каррингтона» или «Солнечная супербуря», включала целый комплекс событий в 1859 г. с 28 августа по 5 сентября: сама магнитная буря, многочисленные пятна и вспышки на Солнце, большой выброс корональной массы. Это событие привело к выходу из строя 1 – 2 сентября телеграфных систем в Европе и Северной Америке. Северное сияние наблюдалось по всему миру. С использованием модели лунно-солнечного гравитационного прилива, успешно применяемого авторами для 19–20 веков, был произведен расчет необходимых параметров модели для 1859 г.

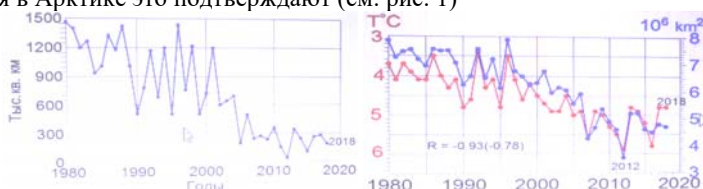
Оказалось, что в наиболее возмущенный период 1 – 2 сентября 1859 г. был гравитационный резонанс EERR-2 (ExtremumoftheEarthRotationRate – 2 означает, что вторая производная скорости вращения Земли (СВЗ) равна нулю). Доступные геогелиофизические данные были проанализированы: в частности, особенности спектрально-временных диаграмм (СВАН-диаграмм) для: 1) скорости вращения Земли, 2) чисел Вольфа, 3) вулканической активности, 4) для некоторых дендрохронологических данных, 5) и 6), а также для важнейших взаимосвязанных климатических характеристик – индийского муссона и явления Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК), которое является главным индикатором климата. Изменение спектра ЭНЮК означает начало перестройки системы. Спектр колебаний Эль-Ниньо – важный климатический параметр системы Земля – океан – атмосфера. С 1850 г. началось изменение характеристик океана – основного резервуара тепла в климатической системе. Спектр Эль-Ниньо - Южное колебание за 17-19 века был построен по данным анализа роста кораллов - чувствительных палеотермометров океанской воды, взятых из рифов на Галапагосских островах и атолле Тарава в Тихом

океане. Резкое изменение спектрально-временных характеристик зафиксировано в конце 19 века, причем долгопериодные гармоники (20 и более лет) вообще исчезают из спектра в 20 веке [4]. Это может свидетельствовать о проявлении стохастического резонанса в климатической системе, при котором в спектре красного шума энергия из самых низких частот перераспределяется между резонансными частотами системы. В период 1650–1750 гг. в спектре Эль-Ниньо – Южное колебание выделяется (основная) полоса в интервале 50-60 лет и полоса гармоник, соответствующих интервалу периодов 3.6–6.0 лет; после этого характер спектра изменился и в 1750–1860 (!) гг. основным колебанием в низких частотах стала гармоника с периодом около 30 лет (ведет к похолоданию), хорошо выделяются также гармоники 3.6-4.6 лет и полоса 7-15 лет; с середины 19 в (1850-60 гг) спектр опять резко изменился в сторону высоких частот (при общем спаде амплитуд только двух оставшихся 3.6 и полосы 4.8–6.0 - летних гармоник, что автоматически ведет к потеплению).

Согласно нашей феноменологической модели современное потепление климата началось в 1860-х гг. путем перестройки всех геосфер под действием солнечной активности [1, 3, 4]. Для атмосферы (плазмосферы) Земли ключевым моментом явилось извержение вулкана Кракатау 20 мая 1883 г. Об этом свидетельствует появление серебристых облаков (80–85 км) через год после извержения. До этого эти облака не наблюдались. С 1884 г. они наблюдаются в обоих полушариях каждый год. Этот факт говорит о том, что изменилась термодинамическая структура атмосферы (температура, циркуляция, химический состав) особенно мезосферы и стратосферы. Изменились электрические характеристики и глобальная электрическая цепь, играющая важную роль в механизме солнечно-земных связей. Об этом свидетельствует взрыв публикаций по шаровой молнии после Кракатау (1883 г.) и последующая корреляция количества публикаций с извержениями вулканов в последующие годы [6]. Сравним события 1850–1900 гг. с чрезвычайными событиями 1990–2020 гг. Спектры индексов квазидвухлетней цикличности (КДЦ) экваториальной стратосферы и координат полюса для периодов доминирующих гармоник подобны с коэффициентом 2, что характеризует параметрический резонанс. Индекс КДЦ – один из важнейших климатических факторов, определяющий реакцию атмосферы на солнечные воздействия. Исследование спектра 13 гармоник, полученного Л.В.Зотовым, периода Чандлера (1.2 года), из которых две являются энергетически определяющими, показали, что остальные 11 гармоник этого спектра также участвуют в параметрическом резонансе (1:2) и вносят свой энергетический вклад. Таким образом, установлена взаимная связь двух генерирующих волновые процессы механизмов, локализованных в экваториальной стратосфере. Стохастические колебания, взаимодействующие с приливами и вызывающие гравитационные резонансы в системе океан – атмосфера (в т.ч. кратные 18.6 и 1.2 г.), указывают на то, что атмосфера и океан совершают вместе с Землей свободные и вынужденные нутационные движения (движения полюсов). Экваториальная зона захватывает нутационные движения атмосферы и океана, и там они хорошо прослеживаются как многолетние волны (2.3; 3.7; 4.7; 6.2 г. они близки к субгармоникам периода Чандлера (2.4; 3.6; 4.8; 6.0 г). Таким образом мы имеем дело со стохастическим, параметрическим и обычным (комбинационным) резонансами в когерентно-резонансных структурах планеты Земля. Известно, что тренд глобального потепления за последние два десятилетия приблизился к нулевому. В связи с этим обратим внимание на катастрофические события последних десятилетий. 1) Второе по величине вулканическое извержение 20 века, и на сегодняшний день самое крупное, затронуло густонаселенный район и произошло на вулкане Пинатубо на Филиппинах 15 июня 1991 г. 2) Эль-Ниньо 1997-98 гг. рассматривалось как одно из самых мощных

событий Эль–Ниньо–Южного колебания в зарегистрированной истории, приведшее к повсеместным засухам, наводнениям и другим стихийным бедствиям по всему земному шару. Это привело к гибели примерно 16% мировых рифовых систем и временному повышению температуры воздуха на 1.5°C по сравнению с обычным повышением на 0.25°C, связанным с событиями Эль-Ниньо. 3) Подводное землетрясение в Индийском океане, произошедшее 26 декабря 2004 г. в 00:58:53 UTC (07:58:53 по местному времени), вызвало цунами, ставшее самым смертоносным в современной истории. Магнитуда землетрясения составила, по разным оценкам, от 9.1 до 9.3. Это землетрясение входит в тройку самых сильных землетрясений за всю историю наблюдения. Эпицентр землетрясения находился в Индийском океане, к северу от острова Симёлуэ, расположенного возле северо-западного берега острова Суматры (Индонезия). Цунами привело к огромным разрушениям и огромному количеству погибших людей, (по разным оценкам, от 225 до 300 тысяч человек).

Не являются ли эти грандиозные события индикаторами, предупреждающими нас о переходе климатической системы в новое состояние – к возможному похолоданию. Во всяком случае о новом маундеровском периоде в литературе уже ведутся дискуссии. Рассмотрение закономерностей в рядах многочисленных метеорологических и климатологических, гео- и гелиофизических рядов наблюдений, а также анализ процессов в геосферах приводит к предварительному выводу о возможном начале очередной перестройки климатической системы за счет действия природных факторов и к изменению циркуляций в атмосфере и океане – началу глобального похолодания. Наблюдения в Арктике это подтверждают (см. рис. 1)



*Рисунок 1. Площадь, занятая морским льдом в сентябре (слева) в Сибирских арктических морях (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) по данным отдела ледовых прогнозов ААНИИ; средняя сентябрьская площадь морского льда (справа) в Северном Ледовитом океане по данным ААНИИ и летняя (июнь-август) приповерхностная температура воздуха в морской Арктике. Полагают, что это проявление 60-летнего арктического колебания.*

## **Литература / References:**

1. Перов С.П., Показеев К.В. О физических механизмах климатической изменчивости. Современные глобальные изменения природной среды. Т.4. Факторы глобальных изменений. М.: Научный мир, 2012. С. 88–121.
2. Чукова Ю.П. От М. Планка, А. Эйнштейна и Л. Ландау до Римского клуба. М.: Мегapolis, 2020. 216 с.
3. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Наука, Физматлит, 2002. 394 с.
4. Перов С.П., Тимашев С.Ф. Резонансные частоты в динамике Земли как планеты и климат Земли // Сб. Докл. XIX Межд. Симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». ИО СО РАН, 2013.
5. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.
6. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. М.: Мир, 1983. 288 с.



## КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА, ПРИЛИВЫ В ГЕЛИО- ГЕОСФЕРАХ И ВИРУСНЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ

**С.П. Перов<sup>1</sup>, А. С. Перов<sup>2</sup>, Н. С. Сидоренков<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Центральная Аэрологическая Обсерватория, Москва*

<sup>2</sup> *Российский Университет Дружбы Народов, Москва, avorharp@gmail.com*

<sup>3</sup> *Гидрометцентр России, Москва, sperov35@mail.ru*

Предложена новая концепция космической погоды, в которой главную роль играет не «солнечная активность», а гравитационные приливы в системе Земля-Луна-Солнце, определяющие важнейшие процессы во всех «сферах» планеты Земля. Экспериментально многолетними наблюдениями установлено, что 1) эти процессы синхронизованы этими приливами, 2) они носят дискретный, «квантовый», резонансный характер, 3) к ним может применяться феноменологическая модель «взаимодействующих осцилляторов» [1–3, 5, 6].

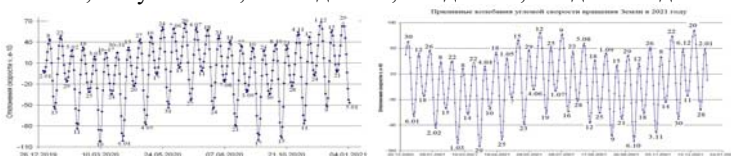
В отличие от традиционной трудно прогнозируемой солнечной и геомагнитной космической погоды надежный прогноз для соответствующих осцилляторов «лунно-солнечной» космической погоды основан на хорошо известных и широко употребляемых в космической деятельности законах небесной механики [1–3]. Такой подход успешно используется для моделирования процессов в различных структурах стратифицированного геоида, его жидкого ядра, гидро-и криосферы, а также в самой сложной в современной физике открытой неравновесной плазма-магнитосферной термодинамической системе - разреженной газопылевой оболочке планеты с ее радиационными поясами, переходящей в солнечную корону, постоянно подверженную пространственно-временным вариациям.

В теории приливов было показано, что кроме суточных, полусуточных, 8-ми часовых и других гармоник суточного прилива важнейшую роль в атмосферных (геосферных) процессах играют многодневные гравитационные лунно-солнечные приливы. Этому способствовало развитие в СССР после войны широкой сети аэрологических станций на территории СССР, многих станций ракетного зондирования (СРЗА), научно-исследовательских судов (НИС) с аэрологическими и ракетными комплексами с регулярными рейсами в трех океанах. СССР внес существенный вклад в ныне широко используемую (в т ч в [1, 2]) базу данных для реанализов, завершенных в США в 1998 г.

Многолетний сравнительный мониторинг динамики синоптических процессов и приливных колебаний скорости вращения Земли  $v$  показал, что смены погоды происходят вблизи экстремумов (минимумов или максимумов) приливных колебаний скорости вращения Земли (ПСВЗ)  $v$ . Но минимумы  $v$  наблюдаются вблизи лунных равноденствий, когда склонение Луны равно  $0^\circ$ , а максимумы  $v$  – вблизи луностояний (модуль склонения Луны максимален). Подобно тому как «осциллятор Земля-Солнце» за год создает трехмесячные сезоны, так и вследствие месячного обращения Земли вокруг барицентра «осциллятора Земля-Луна» в режимах погоды выделяются своего рода квазинедельные «сезоны» (или «кванты») погоды, получившие название естественного синоптического периода (ЕСП), термина, введенного в науку Б.П. Мультиановским в 1933 г., при развитии (начиная с 1915 г.) синоптического метода долгосрочного прогноза погоды. Лунные ЕСП в отличие от солнечных сезонов непостоянны: они варьируют от 4 до 9 суток при средней продолжительности 6.8 сут. Эти вариации обусловлены модуляцией колебаний приливных сил из-за движения перигея лунной орбиты. Публикуемые и распространяемые среди специалистов графики ПСВЗ  $v$  (рис. 1.) дают своего рода «расписание» ЕСП, демонстрируя, что его

длительность изменяются неслучайным образом. При развитии данной концепции космической погоды понятие ЕСП, дискретного периода любого процесса было наполнено новым содержанием и распространено при анализе временных рядов на муссонные осадки, тропические депрессии и тропические циклоны, тайфуны, другие опасные природные явления: ионосферную и магнитосферную активность, землетрясения и вулканизм. При анализе происшествий (в т.ч. катастроф) в техносфере установлена значимая корреляция космической погоды с инцидентами на атомных электростанциях, транспорте всех типов как в гражданской, так и в оборонной сфере (Ту-154, Ф-116, суда, атомные подводные крейсера, запуски ракет и функционирование спутниковой аппаратуры в космосе и т.д).

Как показал А.М. Молчанов, Солнечная система с планетами и их спутниками синхронизирована. Система Земля-Луна также синхронизирована при движении вокруг их центра масс, образуя систему многих осцилляторов [1–6], синхронизовано (и предсказуемо!) генерируя в геосферах квазипериодическое повышение уровней электромагнитного (э/м) и гравитационно-акустического излучения. Этот новый космический фактор [7] влияет на биосферу и здоровье человека, ослабляя его иммунитет. Лунная приливная сила колеблется с периодом 13.65 суток, как функция склонения Луны и геоцентрического расстояния, которые изменяются с течением времени сложным образом. Амплитуда месячных колебаний склонения Луны изменяется с периодом 18.61 г. от 29 до 18 градусов за счет регрессии узлов лунной орбиты, перигей которой движется с периодом 8.85 г., что вызывает изменение указанного выше квазинедельного периода колебаний приливных сил в диапазоне от 5 до 8 дней. В результате амплитуда колебаний скорости вращения Земли (СВЗ) – индикаторов приливных сил изменяется во времени с периодами 18.61, 8.85, 6.0, 1.0, 0.5 г., ежемесячно, полумесячно, еженедельно, ежедневно, полдня и т. д.



*Рисунок 1. Приливные колебания скорости вращения Земли (СВЗ) в 2020 г (вверху) и в 2021 г (внизу). Цифры на кривой – даты наступления максимумов и минимумов v. Как показывает анализ данных заболеваний по всему миру вероятность инфицирования вирусами в эти дни максимальна. На втором месте стоят периоды, определяемые точками перегиба кривой v.*

Эффективность нашей модели продемонстрирована при анализе данных мониторинга пандемии COVID-19 2020 г. (вирус SARS-CoV-2), ежедневно публикуемых Университетом Джона Хопкинса (JHU) и Роспотребнадзором [8], а также эпидемии гриппа (вирус A(H1N1)pdm2009) в Москве в 2010–2011 гг. [9]. Рис.2 иллюстрирует степень синхронизации теоретического расчета и реальных данных и предупреждает о повышенной вероятности инфицирования на следующий после экстремума СВЗ день. Уникальность ситуации заключается в возможности сразу проверить результаты, используя [8] и теоретический расчет, убедиться в их правильности и, следовательно, быть уверенным в достоверности сделанных прогнозов.

Неблагоприятное воздействие на организм человека при экстремумах (~5 в месяц) и в точке перегиба кривых (~5 в месяц) регулярно регистрировалось в Москве в течение 5 лет Службой скорой помощи практически для всех видов диагнозов (несколько сотен) и подтверждается спектрально-временным анализом [10], выявляющим в спектрах 7 -,

3.5 - дневные и другие "лунные" гармоники. Объяснение этому важному факту лежит по мнению А.Г. Гамбурцева и его коллег в основном в «социальной неделе», хотя допускается присутствие природного фактора. Авторы придерживаются другого мнения. Не отрицая влияния «социальной недели» необходимо учитывать прежде всего природный фактор, поскольку он и определяет «расписание» наиболее опасных заболеваний: сердечно-сосудистой системы, онкологических, вирусных и др. и должен учитываться при профилактике и лечении таких заболеваний.

*Число случаев (ось Y- горизонтальная) с данным отклонением (ось X - вертикальная)*

X	Y 0	5	10	15	20	25	30
-2	XXXX 4						
-1	XXXX 4						
0	XXXXX XXXXX XXXXX XXXXX XXXXX XXXXXX 31						
+1	XXXXX XXXXX XXXXX XXXX 19						
+2	XXXX 4						
+3	X						
+4	X						

*Рисунок 2. Гистограмма отклонения (в днях) от теоретически рассчитанных дней с оценкой синхронизации заболеваний в 10 странах (США, Великобритания, Италия, Испания, Франция, Бразилия, Бельгия, Иран, Нидерланды) в период с 3 марта по 10 мая с.г. По оси X число случаев с данным отклонением по оси Y. 80% случаев находятся в интервале 0, +1 дней отклонений.*

Предлагается информировать о результатах настоящей работы Всемирную Организацию Здравоохранения (ВОЗ).

#### **Литература / References:**

1. Сидоренков Н.С. Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14. №3. С. 5.
2. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Наука, Физматлит, 2002. 384 с.
3. Перов С.П., Показеев К.В., Сидоренков Н.С. О чем говорят факторы глобальных изменений // Матер. Докл. Наст. Меропр. 2020.
4. Перов С.П. Взаимодействие астрономических и геодинамических осцилляторов определяет процессы в атмосфере и океане // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. 2012. D-357-3.
5. Perov A., Perov S. EGU Presentation. Austria, Vienna, 2018.
6. Перов С.П., Сидоренков Н.С. Прогноз изменчивости естественных синоптических периодов в 2017 г. // Земля и Вселенная. 2018. № 2. С. 99.
7. Цетлин В.В., Степанова Г.П., Перов А.П. Геофизическое модулирование воздействия электромагнитных факторов на воду и внутреннюю водную среду живых организмов // Матер. Докл. Наст. Меропр. 2020.
8. Яндекс Карты Коронавирус
9. Черешнев В.А. и др. Внешние воздействия–стрессы–заболеваемость. М.: Наука, 2016.
10. Гамбурцев А.Г. и др. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М.: Светоч Плюс, 2009.









соответственно), характерно, что в течении недели до мониторинга дул ветер западных румбов, сменяясь на южные, а порывы не превышали 7 м/с, и при этом самый большой результат был получен при обследовании 27 сентября и скорее всего это связано с тем, что за 9 дней до мониторинга на северном побережье был зафиксирован сильный ветер север-северо-западного направления с порывами до 16 м/с.

В тоже время поиск взаимосвязей у пос. Рыбное, где при 3-х повторных обследований № 23, 38, 46 было обнаружено 56, 50 и 54 фрагмента геосинтетических материалов соответственно, показал, что наиболее высокие результаты загрязнённости были получены после ветров северных и западных румбов с порывами до 11 м/с, действовавших над акваторией Светлогорской бухты за 1,5 недели до обследований. А для обследований № 1 и № 14 (23 и 29 фрагментов соответственно) зафиксированы ветра запад-юго-западных румбов с порывами до 16 м/с.

Стоит отметить, что для Светлогорской бухты направления ветра с востока, юга и юга-запада являются дующими с берега. При таких ветрах пляж всегда находится в теневой зоне и метеорологические условия никак не влияют на перенос фрагментов геосинтетических материалов на пляже, как и в принципе всей массы песка.

При направлении ветра запад-юго-западных румбов можно предположить 2 параллельных варианта событий, почему было найдено не такое большое количество фрагментов: воздействие ветра этого направления не позволяет волнам выносить на пляж остатки геосинтетических материалов и при этом тот же самый ветер, имея вдольбереговую составляющую, перевевает песок и способствует засыпанию имеющиеся на пляже фрагментов.

Основной вклад всё же вносят ветра западных, северо-западных и северных направлений. Даже если они не слишком сильные, они дуют с моря и инициируют вынос волнами на пляж остатков геосинтетических материалов, которые уже достаточно давно мигрируют вдоль берега после разрушения берегозащитных сооружений, находящихся на северном побережье Самбийского полуострова. Наличие таких берегозащитных сооружений в пределах Светлогорской бухты также вносит существенный вклад в загрязнение побережья на этом участке берега.

Таким образом, при поиске взаимосвязей загрязнения побережья Светлогорской бухты остатками геосинтетических материалов было выявлено, что наибольшее количество фрагментов было обнаружено после ветров северных и западных румбов (со скоростью более 10 м/с). Полученные данные о загрязнённости пляжевой полосы и вариации этой величины в зависимости от метеорологических условий могут быть использованы для верификации численных моделей распространения загрязнений в локальных условиях изрезанного берега, при наличие как вдольберегового, так и поперек-берегового транспорта наносов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № № 18-55-76002 ЭРА\_а (сбор и первичный анализ данных по загрязнённости остатками геосинтетических материалов) и госзадания № 0149-2019-0013 (анализ метеорологических условий).*

### **Литература / References:**

1. Есюкова Е.Е., Чубаренко Б.В., Бурнашов Е.М. Геосинтетические материалы как источник загрязнения пластиковым мусором морской среды // Региональная экология. 2018. № 3 (53). С. 15–28.
2. Есюкова Е.Е., Исаченко И.А. Фрагменты геосинтетических материалов на побережье Калининградской области (Балтийское море): особенности и характеристики // Сб. тр. Межд. симп. “Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере” (МСП-2018). Москва, 2018. С. 115–118.
3. Есюкова Е.Е., Чубаренко Б.В., Чубаренко И.П., Килесо А.В., Железова Е.В., Граве А.В., Цуканова

Е.С., Собаева Д.А., Танурков А.Г., Юшманова А.В., Турко Н.А. Методика отбора и учёта фрагментов геосинтетических материалов и ее тестирование для пляжей Юго-Восточной Балтики // Мат. Конф. «Арктические берега: путь к устойчивости» Мурманск: МАГУ, 2018. С. 76–79.

4. Kileso A.V., Esiukova E.E., Pinchuk V.S., Chubarenko B.V. Traces of the transboundary pollution of the shore of the Southeastern Baltic by the debris of geosynthetic materials. // Сб. матер. IV Межд. науч.-практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста «Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов». Брест: БрГУ, 2019. Ч. 1. С. 215–216.
5. Esiukova E., Chubarenko B., Simon F.-G. Debris of geosynthetic materials on the shore of South-Eastern Baltic (Kaliningrad Oblast, Russian Federation) // Proc. of 7th IEEE/OES Baltic Symposium "Clean and Safe Baltic Sea and Energy Security for the Baltic countries", 2018. IEEE Xplore Digital Library, 2018. pp. 1–6. DOI 10.1109/BALTIC.2018.8634842



## ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ИНДУЦИРОВАННАЯ ВЕТРОВЫМИ ВОЛНАМИ

**В.Г. Полников, Ф. Цяо**

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва*

*First Institute of Oceanography of Ministry of Natural Resources, Qingdao, China*

На основе лабораторных измерений трех компонент скорости на трех горизонтах в воде при наличии ветровых волн изучена степень анизотропии индуцированной волнами турбулентности, как в терминах стандартных отклонений (СтО) для компонент скорости (до и после фильтрации волновых движений), так и в терминах их частотных спектров  $S_x(f)$ ,  $S_y(f)$  и  $S_z(f)$ . Для степенных участков спектров вида  $S(f) \sim f^{-n}$  получены оценки скорости диссипации турбулентности  $\varepsilon$  (СДТ). Построены параметризации указанных характеристик.

**Описание эксперимента.** Измерения выполнялись в ветро-волновом лотке Первого института океанографии, расположенного в г. Циндао, КНР (рис. 1). Размеры лотка по длине, ширине и высоте составляют 32x1x2х м<sup>3</sup>, высота заполнения водой – 1.2м. Эксперимент выполнялся как для механических волн, генерируемых волнопродуктором, так и для ветровых волн. Здесь представлены результаты для ветровых волн.

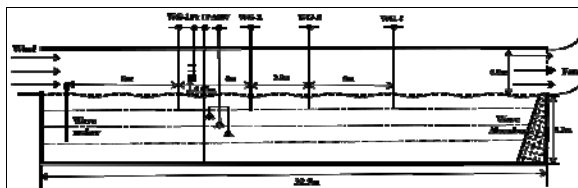


Рисунок 1. Эскиз лотка и расположения оборудования. WG - волновые датчики, PT - трубки Пито, ADV - набор акустических доплеровских велосиметров, IP – набор инструментов для вбрасывания в лоток поплавков или красителей. Ширина лотка 1 м. Места расположения датчиков WG1-WG4 обозначаются как точки измерений P1-P4.

Задавались значения ветра - 4, 6, 8, 10 и 12 м/с: дискретность измерения волн – 50 Гц, для течений – 100 Гц при глубине измерений  $z = -10, -20$  см и 128 Гц при  $z = -30$  см. Расчет спектров выполнен в MATLAB методом авто-регрессии (АР).

**Форма спектров.** Типичные спектры приведены на рис. 2. Их особенности таковы:

- 1) В области частоты пика волн  $f_p$  имеется острый горб (рис. 2, б), означающий вклад волновых компонент, требующих фильтрации.
- 2) В НЧ-области ( $f < 0.5f_p$ ) и в ВЧ-области ( $f > 2f_p$ ), спектры  $S_x(f)$ ,  $S_y(f)$  близки по форме и спадают как

$$S(f) \propto f^{-5/3} . \quad (1)$$

3) Спектр  $S_z(f)$  в НЧ-области спадает как (1), а в ВЧ-области, как правило, спадает как

$$S_z(f) \propto f^{-2} , \quad (2)$$

т.е. имеет место горизонтально-вертикальная анизотропия формы спектров.

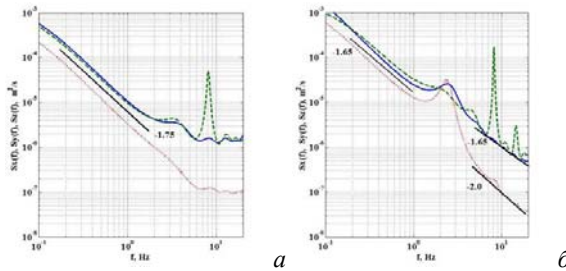


Рисунок 2. Спектры компонент скорости течений  $S_x(f)$  (сплошная),  $S_y(f)$  (штриховая),  $S_z(f)$  (пунктирная), в точке  $P2 = 12$  м для  $z = -10$  см. а)  $W = 4$  м/с ; б)  $W = 8$  м/с.

**Фильтрация волновых движений.** Наиболее полный, но громоздкий метод фильтрации [1] приводит к сглаживанию горба в спектрах  $S_i(f)$  в области частоты  $f_p$ . На этом основании предлагается выполнять фильтрацию волновых компонент путем «отсекания» пика в спектре компонент течений, задающим монотонность спада спектра турбулентности  $S_{IF}(f)$  (рис. 3, а, б).

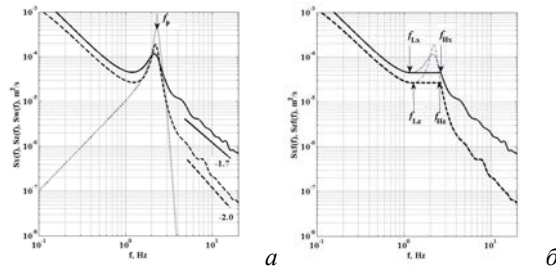


Рисунок 3. а) Спектры течений  $S_x(f)$  (сплошная),  $S_z(f)$  (штриховая), и спектр орбитальной скорости волн  $S_w(f)$  (пунктирная); б) Спектры  $S_{xIF}(f)$  (сплошная), а  $S_{zIF}(f)$  (штриховая) после фильтрации волновых движений ( $W=10$  м/с,  $z = -10$  см).

Простая линейная фильтрация по [2] невозможна в силу того что пик спектра волновых движений (пунктирная линия на рис. 3, а) превышает величину пика спектра измеренных течений.

**Стандартные отклонения рядов течений.** Оценки стандартных отклонений (СтО)  $\sigma_i$  и  $\sigma_{IF}$  компонент течений  $u(t)$  ( $i = x, y, z$ ), характеризуют степень анизотропии рассматриваемых течений. Здесь они определяются по формулам спектрального анализа через спектры  $S_i(f)$  и  $S_{IF}(f)$ . Результаты таковы:

1) Всегда  $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$  и, как правило,  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  почти в 1.5-2 раза больше  $\sigma_z$ , т.е. налицо существенная анизотропия флуктуаций измеренных течений. СтО отфильтрованных компонент скорости  $\sigma_{IF}$  сохраняют характер анизотропии  $\sigma_i$ .

2) Степень указанной анизотропии существенно снижется с глубиной.

3) Отношение  $(\sigma_{IF} / \sigma_i)^2$  (доля энергии турбулентности) порядка и более 70%.

4) Параметризация  $\sigma_{IF}$  в терминах высоты волн  $a_0$  и частоты пика  $f_p$  имеет вид

$$\sigma_{ifpar} = c_{0i} \delta \cdot [f_p a_0] \exp(-c_{1i} \cdot k_p |z|) \quad (3)$$

при  $c_{0z} = 2.7$ ;  $c_{1z} = 0.1$  для  $\sigma_{zF}$ , и  $c_{0x} = 5.2$ ;  $c_{1x} = (0.1 + Br/2)$  для  $\sigma_x$  (где  $Br$  относительная доля обрушений волн, фиксируемых визуально как отношение числа обрушенных гребней к их полному числу на фиксируемом участке на время 1-2 минуты).

**Оценки скорости диссипации турбулентности.** Для участков спектров, близких к  $f^{-5/3}$ , применима гипотеза Тейлора [3]. Но в данном эксперименте не удалось установить скорость переноса  $U_T$  для выполнения оценки вида  $\varepsilon = C_0 [S(\omega, z) \omega^{5/3}]^{3/2} / U_T(z)$ .

В ВЧ-области вид спектра  $S_z(f) \propto f^{-2}$  аналогичен спектру лагранжевой турбулентности [4]. Принимая гипотезу об их аналогии, запишем

$$S_z(f) = C_p \varepsilon f^{-2} \quad \text{при } C_p \approx 1 \quad (4)$$

Полученные из (4) оценки  $\varepsilon$  с ошибкой порядка 30% описываются параметризацией

$$\varepsilon_{par} = 0.1 [a_0^2 f_p^3] (a_0 / z) \exp(-0.1 k_p |z|), \quad (5)$$

что хорошо согласуется с известными величинами и параметризациями СДТ [5, 6].

*Авторы благодарны коллегам из Первого института океанографии, Х. Ма (Hongyu Ma) и Ш. Чангу (Shumin Jiang) и студентам Ван Ху (Wang Hue) и Ли Чао (Li Chao) за участие в проведении экспериментов. Работа частично поддержана проектами РФФИ, № 18-05-00161, и грантом китайского фонда National Natural Science Foundation of China № 41821004.*

#### Литература / References:

1. Thais L., Magnaudet J. A triple decomposition of the fluctuating motion below laboratory wind water waves // J. Geophys. Res. 1995. V. 100(C1). pp. 741–755.
2. Ефимов В.В., Христофоров Г.Н. Спектры и характеристики статистической взаимосвязи пульсаций скорости в верхнем слое моря и поверхностного волнения // Изв. АН СССР. ФАО. Т. 7. № 12. С. 1290–1310.
3. Lumley J.L., Terray E.A. Kinematic of turbulence convected by a random wave field // J. Phys. Oceanogr. 1983. V. 13 (11). pp. 2000–2007.
4. Голицын Г.С. Статистика и динамика природных процессов и явлений. Москва: Красанд, 2012. 400 с.
5. Kitaigorodskii S.A., Donelan M.A., Lumley J.L., Terray E.A. Wave-turbulence interactions in the upper ocean. Part 2: Statistical characteristics of wave and turbulent components of random velocity field in the marine surface layer // J. Phys. Oceanogr. 1983. V. 13 (11). pp. 1988–1999.
6. Terray E.A., Donelan M.A., Agrawal Y.C. et al. Estimates of Kinetic Energy Dissipation under Breaking Waves // J. Phys. Oceanogr. 1996. V. 26 (5). pp. 792–807.



### АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА МОСКВЫ НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ХИМИКО-ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ SIAM С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ

*Н.А. Пономарёв<sup>1</sup>, В.П. Юшков<sup>1</sup>, Н.Ф. Еланский<sup>2</sup>, В.И. Захаров<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва,

<sup>3</sup> Институт Физики Атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва,

*na.ponomarev@physics.msu.ru*

Долговременные ряды измерений данных концентраций ключевых загрязняющих примесей приземного слоя атмосферы Москвы, на базе сети станций наблюдений «Мосэкомониторинг» (<https://mosecom.ru/>) позволили определить величину и

пространственно-временное распределение городских источников загрязнения атмосферы, а именно такого важного параметра, как эмиссии [1, 2]. Однако, восстановление эмиссий по концентрациям представляет собой обратную задачу, которая не имеет устоявшегося подхода к её решению, что приводит к достаточно большим погрешностям полученных результатов – порядка 40 – 80 %. В связи с этим, авторами данной работы было предложено использование эмиссионных оценок в качестве входных параметров для химико-транспортной модели SILAM, которая позволяет рассчитывать 4-х мерные поля концентраций и сопоставлять их с наблюдениями [3].

При проведении сравнений важно провести детальный анализ ошибок расчетов, разделяя их на долговременные, т.е. сохраняющиеся в течение некоторого времени, а также случайные, представляющие собой стохастичную компоненту неопределённости расчетов. Предлагаемый подход, который можно назвать динамической статистической моделью, который позволяет детально анализировать прежде всего спектральные свойства ошибок, разделяя их по времени и пространству, имеющими различную природу: инструментальные, связанные с синоптическими условиями, автотранспортом, промышленностью, описанием фотохимических процессов. Этот статистический анализ представляет собой самостоятельную сложную задачу и не должен смешиваться с численной реализацией динамических уравнений модели. В дальнейшем, разумеется, результаты такого анализа должны учитываться при её совершенствовании. Процесс этого совершенствования численной модели может быть непрерывным, как и сам статистический анализ. А информация об ошибках используемой модели может быть важна и при коррекции величины эмиссий.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 19-35-90073.*

#### **Литература / References:**

1. Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M. Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // *Atm. Envir.* 2018. V. 175. pp. 54–64.
2. Elansky N.F. Air quality and CO emissions in the Moscow megacity // *Urban Clim.* 2014. V. 8. pp. 42–56. DOI 10.1016/j.uclim.2014.01.0072212-0955/
3. Ponomarev N.A., Elansky N.F., Zakharov V.I., Verevkin Y.M. Optimization of Pollutant Emissions for Air Quality Modeling in Moscow // *Proc. in GeoMedia.* 2020. V. I. Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-030-38177-6\_16



---

## **ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВСПЛЫВАЮЩЕЙ КОНВЕКТИВНОЙ СТРУИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОСТИ**

*Ю.К. Руденко, Ю.Ю. Плаксина, Н.А. Винниченко, А.В. Пуштаев, А.В. Уваров  
МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, ukrudenko@gmail.com*

Взаимодействие всплывающего потока жидкости со свободной поверхностью имеет большое значение для многих геофизических и технических приложений и во многом зависит от состояния поверхности. В нашей работе рассматривалась ситуация, когда температура струи выше температуры окружающей жидкости и увеличение скорости струи происходит за счет термогравитационного механизма. Взаимодействие такой струи с поверхностью также изменяется – архимедова сила приводит к удержанию растекающейся струи у поверхности вплоть до ее остывания. Кроме того, неравномерный нагрев жидкости под поверхностью является дополнительным

фактором изменения профиля давления у поверхности, потому что в гидродинамических струях такой профиль формируется только за счет торможения [1, 2], а здесь существуют оба механизма.

В работе рассматривается конвективная струя, создаваемая линейным источником нагрева, расположенным на разной глубине от поверхности. При приближении источника к поверхности меняется соотношение механизмов растекания – кинетическая энергия струи перестает играть существенную роль при растекании и реализуется горизонтальная конвекция, определяемая только температурной неоднородностью в ситуации, когда числа Рэлея отрицательны.

Одним из самых важных факторов взаимодействия оказывается наличие или отсутствие поверхностной пленки [3]. В воде пленка отсутствует только при высокой степени очистки (деионизация), и по этой причине для воды пленка в рассматриваемых задачах всегда присутствует. Такая же пленка присутствует также в глицерине, парафине, некоторых спиртах. Для второй группы жидкостей (силиконовое масло, этанол, изопропанол и др.) выполняются стандартные условия Пирсона на поверхности. При всплытии струи основным механизмом растекания оказывается термокапиллярный. Структура погранслоя существенно отличается для этих двух групп жидкостей. В работе исследовалось поле скоростей тремя методами – экспериментально, с помощью цифровой трассерной визуализации (PIV), численно, с помощью моделирования, а также с помощью нахождения автомодельных решений для погранслоя вблизи поверхности. Нагрев создавался линейным источником тепла – проволокой из сплава копель длиной 11.3 см и диаметром 0.02 см, натянутой под поверхностью жидкости в прямоугольном стеклянном аквариуме размерами **12.3 × 13.2 × 6.5 см**. Мощности тепловыделения подбирались таким образом, чтобы избежать возникновения трехмерных эффектов. На рис. 1. представлен сравнительный анализ поля горизонтальных скоростей для численного расчета и эксперимента. Как видно из графиков, моделирование и эксперимент дают сходные результаты, но граничные условия в расчетах совершенно различны. Для воды используется условия равенства нулю горизонтальной скорости, для этанола – условия Пирсона [3]. Как видно из графиков, термокапиллярный механизм намного эффективнее с точки зрения условий растекания струи.

Критерии подобия для погранслоя определяются системой уравнений и граничными условиями. Разница состоит в том, что при наличии поверхностной пленки основную роль в уравнениях движения играет архимедова сила, а при отсутствии – сила, возникающая из-за изменения коэффициента поверхностного натяжения (КПН).

При наличии пленки автомодельное решение определяется следующими параметрами: автомодельная координата  $\xi = y / \sqrt{x}$ , горизонтальная скорость  $v_x = f'(\xi)$ , вертикальная скорость  $v_y = (\xi f' - f) / (2\sqrt{x})$ , поле температур  $T(x, y) - T_0 = g(\xi) / \sqrt{x}$ . При наличии конвекции Марангони  $\xi = y / x^{3/4}$ ,  $v_x = f'(\xi) / \sqrt{x}$ ,  $T = g(\xi) / x^{1/4}$ ,  $v_y = (3\xi f' - f) / 4x^{3/4}$ . Здесь  $f$  и  $g$  — функции, которые определяются при численном решении обыкновенных дифференциальных уравнений.

На рис. 2 представлен сравнительный анализ автомодельного решения, численного решения и экспериментальные измерения методом PIV. Погранслоем занимает фиксированный интервал по автомодельной координате  $\xi$ . Граница отчетливо видна на графиках. Автомодельные решения позволяют анализировать профили скоростей и температур в широком диапазоне начальных условий без дополнительного численного моделирования.

Вертикальная струя при заглубленном источнике исследовалась довольно давно и решение хорошо известно [4]. Однако при приближении к поверхности основную роль

начинает играть градиент давления по вертикальной оси, который в решении Гебхарта не учитывается. В пограничном поперечный градиент давления сильно превышает вязкостные члены и компенсируется полем температур вблизи поверхности (в отличие от стандартной задачи Прандтля для гидродинамического пограничного слоя, где этот градиент равен нулю). На рис. 3 приведен сравнительный анализ поля скоростей при приближении источника к поверхности.

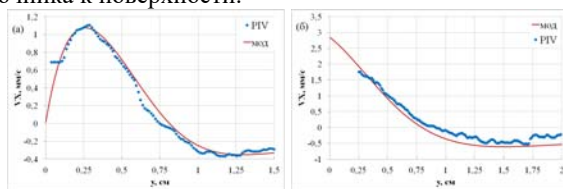


Рисунок 1. Вертикальные профили горизонтальной скорости из PIV и моделирования при глубине источника нагрева  $h = 10$  мм спустя  $t = 20$  с от начала нагрева в а) воде, мощность нагрева  $Q = 30$  Вт/м, б) этаноле,  $Q = 4$  Вт/м.

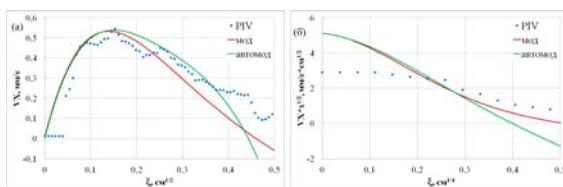


Рисунок 2. Сравнительный анализ автомоделного решения, численного решения и экспериментальных измерений методом PIV. а) Вода,  $h = 0$ ,  $Q = 14.7$  Вт/м; б) этанол,  $h = 0$ ,  $Q = 4.1$  Вт/м.

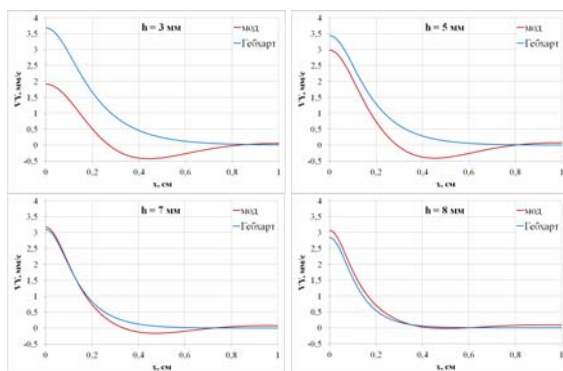


Рисунок 3. Сравнительный анализ горизонтальных профилей вертикальной скорости в воде из моделирования и по решению Гебхарта на разном расстоянии  $h$  от поверхности при глубине источника 10 мм и мощности нагрева  $Q = 30$  Вт/м.

Хорошо видно, что приближение к поверхности приводит к отклонению от стандартного решения задачи всплытия конвективной струи. Таким образом, в работе на основе метода PIV, численного моделирования и получения автомоделных решений показано, что взаимодействие конвективных и гидродинамических струй с поверхностью жидкости существенно отличается. Архимедова сила приводит к перераспределению давления у поверхности, и этот фактор либо добавляется к



стандартному переходу кинетической энергии струи в потенциальную при отражении, либо остается единственным механизмом разгона струи при приближении источника нагрева к поверхности. Второй важной особенностью является отсутствие или наличие поверхностной пленки в жидкости. Наличие пленки блокирует термокапиллярный механизм. Струя растекается, но скорость растекания существенно падает (более чем на порядок величины).

#### **Литература / References:**

1. Glauert M.B. The wall jet // J. Fluid Mech. 1956. V. 1. pp. 625–643.
2. Phares D.J., Smedley G.T., Flagan R.C. The inviscid impingement of a jet with arbitrary velocity profile // Phys. Fluids. 2000. V. 12. pp. 2046–2055.
3. Vinnichenko N.A., Uvarov A.V., Plaksina Y.Y. Combined study of heat exchange near the liquid–gas interface by means of background oriented schlieren and infrared thermal imaging // Exp. Therm. Fluid Sci. 2014. V. 59. pp. 238–245.
4. Gebhart B., Pera L., Schorr A.W. Steady laminar natural convection plumes above a horizontal line heat source // Int. J. Heat Mass Transfer. 1970. V. 13. pp. 161–171.



---

### **РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИИ СЕДИМЕНТАЦИИ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ НОВОЙ ЗЕМЛИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 11.3 КАЛЕНДАРНЫХ ТЫС. ЛЕТ (ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ ЗАЛИВОВ ОГА И ЦИВОЛЬКИ)**

**В.Ю. Русаков<sup>1</sup>, Е.Е. Талденкова<sup>2</sup>, А.П. Борисов<sup>1</sup>, Т.Г. Кузьмина<sup>1</sup>, Т.В. Ромашова<sup>1</sup>,  
Г.Ю. Соловьева<sup>1</sup>, Р.А. Лукманов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва,  
rusakov@geokhi.ru*

<sup>2</sup> *МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва,  
etaldenkova@mail.ru*

Главной особенностью Северного острова архипелага Новая Земля является наличие ледового щита, покрывающего около 70% его площади мощностью в несколько сотен метров. Щит представляет собой реликтовое образование, сформированное в период континентального оледенения позднего плейстоцена мощностью около 1.0–1.5 км в районе Новой Земли, простиравшееся на значительную площадь Баренцева и Карского морей [1–4, 6, 8, 10–13]. Последний последниковый подъем уровня Мирового океана, начавшийся около 19 календарных тыс. лет назад (кал.тыс.л.н.) [7, 14] привел к тому, что ледники отступили вглубь архипелага, оставив за собой глубокие и протяженные заливы (фьорды). Сегодня ледники Северного острова, как правило, разгружаются в заливах, опоясывающих остров, где происходит отел айсбергов. Поскольку теплоемкость воды значительно выше теплоемкости воздуха, наиболее активное таяние льдов происходит при их контакте с водными массами. Исходя из этого, гипотетически можно предположить, что миграция (пульсация) внешней границы новоземельских ледников в период дегляциации и позже происходила в пределах, близких к береговой линии.

Нами изучены две колонки донных осадков, отобранных в двух восточных заливах Северного острова архипелага Новая Земля в ходе 63-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”. В заливе Ога отобрана кол. АМК-5248, а в заливе Цивольки – кол. АМК-5251. Возрастная модель вскрытого колонками осадочного разреза была построена на основе радиоуглеродных датировок бентосных фораминифер методом



ускорительной масс-спектрометрии (AMS<sup>14</sup>C). Максимальный возраст донных осадков кол. АМК-5248 составил 1.0 кал. тыс. лет, а кол. АМК-5251 – 11.3 кал. тыс. лет. Это позволило с разной разрешающей способностью реконструировать историю седиментации в заливах в течение последнего миллениума и в течение всего голоцена, соответственно.

Исходя из литологического, минерального и химического состава донных осадков, а также включений микрофоссилий и материала айсбергового и ледового разноса (IRD) были реконструированы основные климатически обусловленные события движения ледников восточного побережья архипелага, впадающих в упомянутые заливы.

**Движение ледника Голубой, впадающего в залив Ога за последнюю тыс. лет.** В течение относительно теплого средневековья между ~1000 и ~1300 годами нашей эры (г.н.э.) произошла активная деградация ледника Голубой, сопровождающаяся поставкой в залив большого количества IRD. С началом малого ледникового периода климат стал более суровый, что привело к относительной стабилизации положения ледника в промежутке времени между ~1300 и ~1400 г.н.э., а затем и к его продвижению (проградации) в сторону моря после 1400 г.н.э. Со второй половины XVI века ледник постепенно отступал вглубь залива (пульсирующее отступление). Следствием его отступления является дефицит питания, осуществляемый преимущественно за счет метельного переноса снега западными ветрами. После 1920 г.н.э. деградация ледника усилилась в результате быстрого потепления, охватившего всю Арктику и Субарктику (современное потепление).

**Движение ледника Серп и Молот, впадающего в залив Цивольки за последние 11.3 кал. тыс. лет.** Накопление донных осадков, включающих морскую фауну, на дне залива Цивольки началось не позднее 11.3 кал. тыс. л.н. и в последствии характеризовалось накоплением сравнительно однородного осадочного материала, доминирующим источником которого являлся ледник Серп и Молот. То есть, уже в самом начале голоцена условия во внешней части залива способствовали развитию первичной продукции, т.е. сезонному открытию поверхности воды ото льдов. Сравнительно низкие скорости аккумуляции осадков в раннем голоцене по сравнению со средним голоценом, отмеченные в кол. АМК-5251, возможно, указывают на относительно стабильное положение внешнего края ледника, располагавшегося в глубине залива. Об этом же свидетельствует и состав микрофоссилий, в котором среди бентосных фораминифер доминируют виды *Cassidulina reniforme* и *Islandiella norcrossi*, характерные для дистальных областей арктических фьордов [5], и присутствует относительно глубоководный вид *Melonis barleeanus*, указывающий на постоянное влияние морских вод в заливе.

Период между 6.5–3.5 кал. тыс. л.н. отражает перестройку режима седиментации. В это время происходит увеличение в 2 раза скорости седиментации, а также постепенная смена литологического, минерального и химического состава донных отложений. Увеличение скорости аккумуляции осадков можно объяснить, как приближением края ледника Серп и Молот к точке отбора колонки, так и следствием усиления экзарации ледником скальных пород архипелага. Наблюдается рост скорости аккумуляции раковин бентосных и планктонных фораминифер и максимальное видовое разнообразие среди всех групп микрофоссилий, велика относительная численность видов, приуроченных к районам повышенной сезонной продуктивности у края льдов. Гипотетически подобные изменения условий седиментации в заливе могут свидетельствовать в пользу увеличения питания ледника за счет увеличения количества атмосферных осадков.

Поздний голоцен (позже 3.5 кал.тыс.л.н.) характеризуется установлением режима

седиментации в заливе, близкого к современному. Ведущая роль слабодифференцированных обломочных минералов сменяется ведущей ролью глинистых минералов. То есть, глинисто-обломочные отложения сменяются обломочно-глинистыми, указывая на уменьшение влияния экзарации и увеличение влияния стока талых вод снежников с берегов, окружающих залив. Наблюдается некоторое обмеление залива, связанное с гляциоизостатическим подъемом территории, о чем свидетельствует практически полное исчезновение вида *M. barleeanus*. Вероятно, ледник постепенно отступал вглубь залива, в связи с чем, скорости седиментации уменьшались вплоть до минимальных значений около 5 см/тыс. лет в последнюю тысячу лет.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант: 18-05-00032.*

### **Литература / References:**

1. Elverhøi A., Anders E.S., Dokken T., Hebbeln D., Spielhagen R., Svendsen J., Sørflaten M., Rørnes A., Hald M., Forsberg C.S. The growth and decay of the Late Weichselian ice sheet in western Svalbard and adjacent areas based on provenance studies of marine sediments // *Quat. Res.* 1995. V. 44. pp. 303–316.
2. Forman S.L., Lubinski D.J., Zeeberg J.J., Polyak L., Miller G.H., Matishov G., Tarasov G. Postglacial emergence and Late Quaternary glaciation on northern Novaya Zemlya Russia // *Boreas.* 1999. V. 28. pp. 133–145.
3. Forman S.L., Ingólfsson O., Gataullin V., Manley W.F., Lokrantz H. Late Quaternary stratigraphy of western Yamal Peninsula, Russia: new constraints on the configuration of the Eurasian ice sheet // *Geology.* 1999. V. 27. pp. 807–810.
4. Gataullin V.L., Polyak L., Epstein O., Romanyuk B. Glacigenic deposits of the Central Deep: A key to the late Quaternary evolution of the eastern Barents Sea // *Boreas.* 1993. V. 22. pp. 47–58.
5. Korsun S., Hald M. Modern benthic Foraminifera off Novaya Zemlya tidewater glaciers // *Russ. Arctic and Alpine Res.* 1998. V. 30 (1). pp. 61–77.
6. Lambeck K. Constraints on the Late Weichselian ice sheet over the Barents Sea from observations of raised shorelines // *Quat. Sci. Rev.* 1995. V. 14. pp. 1–16.
7. Lambeck K., Rouby H., Purcell A., Sun Y., Sambridge M. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene // *PNAS.* 2014. 111 (43). DOI 10.1073/pnas.1411762111
8. Patton H., Andreassen K., Bjarnadóttir L.R., Dowdeswell J.A., Winsborrow M.C.M., Noormets R., Polyak L., Auriac A., Hubbard A. Geophysical constraints on the dynamics and retreat of the Barents Sea ice sheet as a paleobenchmark for models of marine ice sheet deglaciation // *Rev. Geophys.* 2015. V. 53. pp. 1051–1098.
9. Peltier W.R. Mantle viscosity and ice-age ice sheet topography // *Science.* 1996. V. 273. pp. 1359–1364.
10. Polyak L., Forman S.L., Herlihy F.A., Ivanov G., Krinitsky P. Late Weichselian deglacial history of the Svytaya (Saint) Anna Trough, northern Kara Sea, Arctic Russia // *Mar. Geol.* 1997. V. 143. pp. 169–187.
11. Polyak L., Lehman S.J., Gataullin V., Jull A.J.T. Two-step deglaciation of the southeastern Barents Sea // *Geology.* 1995. V. 23. pp. 567–571.
12. Polyak L., Levitan M., Gataullin V., Khusid T., Mikhailov V., Mukhina V. The impact of glaciation, river-discharge and sea-level change on Late Quaternary environments in the south-west Kara Sea // *Int. J. Earth Sci.* 2000. V. 89. pp. 550–562.
13. Solheim A., Russwurm L., Elverhøi A., Nyland-Berg M. Glacial geomorphic features in the northern Barents Sea: Direct evidence for grounded ice and implications for the pattern of deglaciation and late glacial sedimentation // *Glacimarine Environments: Processes and Sediments.* Geol. Soc. of London Special Publication. Dowdeswell J.A., Scourse J.D. (eds.) 1990. V. 53. pp. 253–268.
14. Yokoyama Y., Lambeck K., De Deckker P., Johnston P., Fifield L.K. Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima // *Nature.* 2000. V. 406. pp. 713–716.



## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СИНАБУНГА (ИНДОНЕЗИЯ) В АВГУСТЕ 2020 г.

*С.А. Рябова*

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва,  
ryabovasa@mail.ru*

Вулкан Синабунг, действующий стратовулкан, расположен в северной части острова Суматра (Индонезия), в 60 км к юго-западу от города Медан. Географические координаты: 03°10'12" с.ш., 98°23'31" в.д. Высота над уровнем моря: 2460 м. Это один из 130 действующих вулканов Индонезии.

После перерыва длиной в 1200 лет вулкан Синабунг активировался 28 августа 2010 г. в 18:30 по местному времени и до 2020 г. наблюдалось несколько извержений.

В 1:58 8 августа 2020 г. произошло очередное извержение, которое привело к образованию коричнево-серого шлейфа пепла. Высота столба пепла достигала ~ 2 км над вершиной. Был отмечен дрейф пепла на восток и юго-восток. Позже в тот же день, в 17:18, шлейф пепла поднялся как минимум на 1 км над вершиной и дрейфовал на восток-восток. В результате извержения в 10:16 10 августа образовался плотный серый пепловый шлейф, который поднялся как минимум на 5 км над вершиной (~ 7500 над уровнем моря). Высота бело-серых плюмов, наблюдаемых 12 августа, составила ~ 200 м над вершиной Синабунга. Серия из семи извержений поздно вечером 13 августа привела к образованию пепловых шлейфов высотой ~ 2 км. Первое событие в 6:07 длилось 12 минут и привело к образованию пеплового шлейфа, который поднялся на ~ 2 км. Извержения в 10:30, 14:25 и 14:55 14 августа привели к образованию пепловых шлейфов, которые поднялись на ~ 2,1 км. Пепельный шлейф от события в 16:56 поднялся на ~ 4,2 км и дрейфовал на восток. В 17:24 17 августа шлейф пепла поднялся на ~ 1,5 км. Пепельные шлейфы 18 августа поднялись на ~ 2 км.

Извержения вулканов являются мощным источником возмущений окружающей среды. В частности в окрестностях некоторых действующих вулканов были обнаружены аномальные геомагнитные сигналы, связанные с вулканической деятельностью [3-5]. Эти вариации имеют небольшие амплитуды, обычно несколько нТл [1-2].

В настоящей работе рассматриваются геомагнитные эффекты извержений вулкана Синабунг за период с 8 по 18 августа 2020 г. При выполнении исследований привлекаются данные геомагнитного мониторинга на обсерваториях сети INTERMAGNET и Геофизической обсерватории "Михнево" (MHV) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН).

### **Литература / References:**

1. Рябова С.А. Вариации магнитного поля в период извержения вулкана Тааль (12-13 января 2020 г.) // Сб. науч. мат. XXI Урал. Молод. Науч. Шк. Геофиз. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2020. С. 80–84.
2. Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А., Соловьев С.П., Харламов В.А. Акустический, магнитный и электрические эффекты извержения вулкана Стромболи (Италия) в июле–августе 2019 г. // Физ. Земли. 2020. Т. 5. С. 117–130.
3. Kotsarenko A., Grimalsky V., Pérez Enriquez R., Yutis V., Koshevaya S., Lopez Cruz-Abeyro J.A., Valdez-Gonzalez C., Villegas Cerón R.A. Geomagnetic anomalies observed at volcano Popocatepetl, Mexico // Adv. Geosci. 2008. V. 14. pp. 21–24.
4. Takla E.M., Yoshikawa A., Kawano H., Uozumi T., Abe S. Anomalous geomagnetic variations associated with the volcanic activity of the Mayon volcano, Philippines during 2009–2010 // NRIAG J. Astron. Geophys. 2014. V. 3(2). pp. 130–136.

5. Yukutake T., Utada H., Yoshino T., Watanabe H., Hamano Y., Sasai Y., Kimoto E., Otani K., Shimomura T. Changes in the geomagnetic total intensity observed before the eruption of Oshima volcano in 1986 // J. Geomag. Geoelectr. 1990. V. 42. pp. 277–290.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ В 2018 г.

*С.А. Рябова*

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва,  
ryabovasa@mail.ru*

В последнее время при исследовании геомагнитных возмущений немало внимания уделяется исследованию эффектов солнечной активности и связанных с ней геомагнитных бурь в атмосферном электричестве, главным образом в высоких и средних широтах [1–2, 4–5]. В частности, показано, что внезапное начало бури вызывает индукционные эффекты в электрических полях [3].

В настоящей работе приводятся результаты обработки и анализа аномалий электрических параметров, зарегистрированных на Геофизической обсерватории "Михнево" и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, в период сильных магнитных бурь в 2018 г.

При выполнении настоящих исследований привлекались данные регистрации магнитного поля Земли на Геофизической обсерватории "Михнево", данные регистрации вертикальной компоненты атмосферного электрического тока на Геофизической обсерватории "Михнево" и данные регистрации вертикальной компоненты напряженности электрического поля на Геофизической обсерватории "Михнево" и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы. Географические координаты обсерватории "Михнево": 54.94° с.ш.; 37.73° в.д.; Центра геофизического мониторинга г. Москвы: 55.71° с.ш.; 37.57° в.д.

Анализ отобранных по погодным данным геомагнитных бурь показал, что вариации электрического поля проявляются в виде знакопеременных вариаций или в виде положительных или отрицательных бухтообразных возмущений.

### **Литература / References:**

1. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Оджимек А., Мальшева Л.М. Влияние суббурь в ночном секторе Земли на вариации приземного атмосферного электрического поля в полярных и экваториальных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52(4). pp. 494–500.
2. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М. Эффект магнитной бури в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48(5). pp. 650–659.
3. Смирнов С.Э. Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитную бурю 5 апреля 2010 г. // Докл. РАН. 2014. Т. 456(3). pp. 342–346.
4. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53(4). pp. 532–545.
5. Спивак А.А., Рябова С.А. Вариации электрических характеристик приземной атмосферы в периоды магнитных бурь // Динамич. Проц. Геосф. 2019. Сб. Науч. тр. ИДГ РАН. Вып. 11. С. 142–150.



# ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В Г. МОСКВЕ ВО ВРЕМЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ АКТИВНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОГО КАРАНТИННЫМИ МЕРАМИ ПО COVID-19 В 2020 г.

*С.А. Рябова, А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов*

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва,  
ryabovasa@mail.ru*

Во всем мире от 30 до 40 % современных городов находится в зоне повышенного уровня шума, что оказывает негативное воздействие на здоровье людей, в частности, «шумовое загрязнение» приводит к сокращению продолжительности жизни [3]. В городских условиях акустические шумы характеризуются большим многообразием источников техногенного происхождения, связанных с деятельностью человека [2]. Наиболее распространенными источниками являются работа многочисленных производственных, строительных и транспортных предприятий, энергетических подстанций и движение транспорта [1].

С целью разделения природной и техногенной составляющей акустического шума представляет интерес провести сравнительный анализ особенностей амплитудных и спектральных характеристик акустического шума в условиях мегаполиса (г. Москва) в период карантина по COVID-19 в 2020 г. и в предшествующий карантину период. В период карантина по COVID-19 в г. Москве была временно приостановлена деятельность большинства предприятий и организаций, не связанных с обеспечением жизнедеятельности города. Одновременно это привело к значительному снижению автотранспортной нагрузки на город и железнодорожных перевозок.

В настоящей работе в качестве исходных данных использовались ряды инструментальных наблюдений за микропульсациями атмосферного давления, выполненных в Центре геофизического мониторинга г. Москвы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук с февраля по май 2020 г. Анализировались участки данных в периоды, характеризующиеся спокойной метеобстановкой: отсутствием сильных атмосферных возмущений в виде ураганов и шквалов, а также атмосферных фронтов.

*Исследования выполнены по государственному заданию (тема АААА-А-19\_119021890067-0).*

## **Литература / References:**

1. Бочаров А.А., Колесник А.Г., Соловьев А.В. Акустические шумы урбанизированных территорий на примере г. Томска // Изв. Томск. Политех. Унив. 2012. Т. 321(1). С. 191–196.
2. Рыбнов Ю.С., Харламов В.А. Об источниках сильных инфразвуковых возмущений в мегаполисе // В сб. науч. тр. «Динамические процессы во внутренних и внешних оболочках Земли (геофизика сильных возмущений)». 1995. С. 236–244.
3. Спиридонова Ю.А., Макаров Б.А. Шум и его влияние на человека // Национальные приоритеты России. 1995. Т. 2(9). С. 68–69.



## ЧАСТОТНАЯ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ВОЛН ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ НАД ПОДВОДНЫМ ВАЛОМ

Я.В. Сапрыкина

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, [saprykina@ocean.ru](mailto:saprykina@ocean.ru)

Исследовалась трансформация волн над подводным валом, сложенным из бетонных тетраподов. Вал располагался на уклоне 0.022, средняя высота вала 0.14 м, длина 0.4 м, средняя глубина воды над валом 0.15 м. Схема эксперимента для анализируемых датчиков представлена на рис. 1. Глубина воды около волнопродуктора (0 м) – 0.4 м. Было проведено 23 серии измерений трансформации псевдо монохроматических волн различных высот и периодов. Все волны в лабораторном эксперименте обрушались типом скользящего буруна.

Для оценки изменения энергии волн использовался коэффициент трансформации, определяемый по отношению высот волн после прохождения ими вала (датчик 2, рис. 1) и перед валом (датчик 1, рис. 1):

$$K_{tr} = \frac{H_{2, f}}{H_{1, f}},$$

где  $S$  – спектр волнения,  $f$  – частота и

$$H_s = 4\sqrt{m_0},$$

$$m_0 = \int S df$$

Для оценки диссипации энергии частот различных диапазонов была проведена численная фильтрация хронограмм волнения на волны, частотных диапазонов, соответствующих первым, вторым, третьим и четвертым нелинейным гармоникам. Были вычислены высоты значительных волн, соответствующих частотных диапазонов и коэффициенты трансформации. Коэффициент трансформации показывает, насколько уменьшится высота волн, после прохождения вала за счет отражения и диссипации их энергии при обрушении и трении. Для оценки влияния отражения волн и пористости материала, слагающего вал, было промоделировано распространение волн над таким же валом, но сплошным, без учета отражения, по модели использующей уравнения типа Буссинеска с улучшенными дисперсионными характеристиками. Отражение волн от подводного склона и от волногасителя в модели также отсутствовало. В представленные результаты анализа включены режимы волнения, когда волны обрушаются на валу и когда проходят без обрушения.

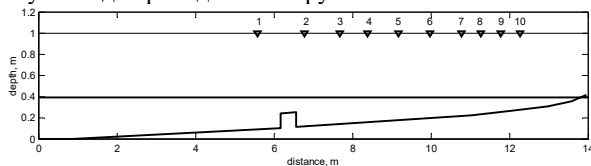


Рисунок 1. Схема эксперимента.

В целом и для лабораторных волн и модельных волн, обрушение волн на валу происходило, когда высота значительных волн перед ним ( $H$ ), отнесенная к глубине воды над валом ( $h$ ) была порядка 0.7 – 0.8. Обрушение в модели задавалось коэффициентом диссипации, действующим при предельной высоте волны ( $H/h$ ) 0.78 и пропорциональным квадрату частоты.

При трансформации волн над подводным валом диссипация энергии нелинейных гармоник происходит избирательно (рис. 2). При одних и тех же значениях предельной высоты энергии первой гармоники уменьшается равномерно, начиная с  $H/h > 0.8$ , энергия вторых нелинейных гармоник уменьшается при  $H/h > 1$ , при  $0.8 < H/h < 1$  их

энергия не меняется. Диссипация энергии третьих и четвертых гармоник происходит при  $H/h > 1.2$ . Их энергия может увеличиваться при  $0.8 < H/h < 1$  и практически не изменяться при  $1 < H/h < 1.2$

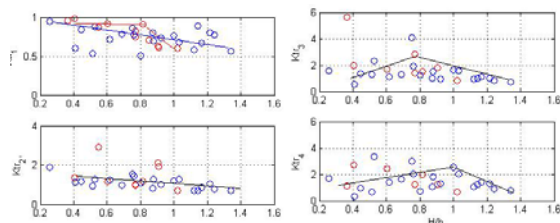


Рисунок 2. Изменение коэффициента трансформации для разных частотных диапазонов спектра: 1, 2, 3 и 4-х нелинейных гармоник. Синие точки – эксперимент, красные – моделирование.

При сравнении модельных и экспериментальных данных видно, что диссипация энергии происходит непропорционально квадрату высоты амплитуд гармоник.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 18-55-45026 и 20-55-46005.



## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБМЕНА ИМПУЛЬСОМ И ТЕПЛОМ МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И ОКЕАНОМ

*Д.А. Сергеев, М.И. Вдовин, Ю.И. Троицкая*

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, sergeev4758@gmail.com*

Турбулентные потоки импульса, явного и скрытого тепла на поверхности моря определяют обмен энергией и импульсом между атмосферой и океаном. Эти величины являются важной составной частью моделей циркуляции атмосферы и океана, которые представляют собой один из основных инструментов климатических исследований, прогнозирования погоды, моделирования процессов в пограничных слоях и т.д.

При численном моделировании климата и погоды, турбулентные потоки между атмосферой и океаном количественно выражаются через «балк»-формулы, которые связывают их со средними метеорологическими величинами, измеренными на стандартной высоте 10 м (скоростью ветра  $U_{10}$ , перепадом температур  $\Delta T_{10} = T_{10} - T_0$ ) используя определения коэффициентов обмена:  $C_D$  - импульсом (коэффициент сопротивления),  $C_T$  - теплом (см. [1, 2]).

Исследования обмена импульсом в широком диапазоне условий, в том числе при сильных ветрах, выполнялись во многих экспериментальных исследованиях. К настоящему времени можно считать достоверно установленным факт тенденции насыщения аэродинамического сопротивления при превышении порогового значения  $U_{10}$  около 27 м/с (см. [3, 4]). После превышения этого порога коэффициент сопротивления практически перестает расти с ростом скорости ветра. Это связывают в первую очередь с влиянием обрушений волн, образованием пены и началом генерации брызг.

Экспериментальные данные о зависимости коэффициента теплообмена от скорости ветра характеризуются более значительным разбросом, чем для импульса. Наблюдения (см., например, [1]) и лабораторные данные [5] показывают, что эта зависимость более слабая, чем для  $C_D$ , однако в характере зависимости в разных моделях имеются



различия. Так, алгоритм COARE 3.0 (см. [1]) указывает на слабый рост  $C_T$  с ростом скорости ветра  $U_{10}$ , аналогичная зависимость была получена в работе [6] и лабораторном эксперименте [5], а в работах [7] зависимости  $C_T$  от скорости ветра не обнаружено. Также в недавнем лабораторном эксперименте [8], в котором исследовался теплообмен при сильном ветре, была обнаружена слабая зависимость коэффициента переноса скаляра от скорости ветра.

Целью настоящего исследования явилось изучение влияния волнения на поверхности воды на обмен импульсом и массой в приводном пограничном слое воздуха. Сложность подобного исследования связана с тем, что волны возбуждаются ветром, и сложно отличить вклад в теплоперенос, вызванный волновыми возмущениями, от влияния особенностей турбулентного переноса, определяемого скоростью ветра. Главным отличием настоящего исследования от предшествующих экспериментальных работ и натуральных наблюдений, перечисленных выше, является применение искусственного независимого от скорости ветра управления параметрами волнения. В связи с этим удалось оценить вклады ветра и волнения в коэффициенты передачи тепла и импульса, а также в температурную шероховатость.

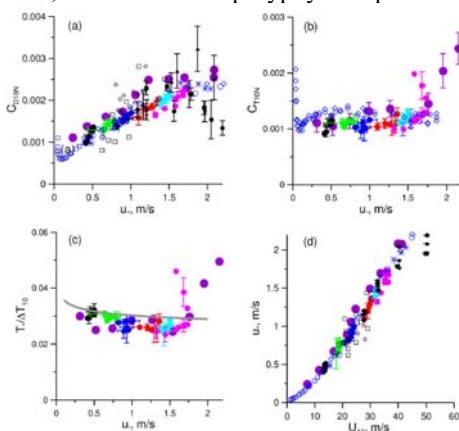


Рисунок 1. Зависимости от  $u^*$  коэффициента сопротивления  $C_D$  (а), открытые черные символы результаты из [9]; коэффициент теплообмена  $C_T$  (б); параметр температурной стратификации (в);  $u^*$  как функция  $U_{10}$  (г). Серая линия аппроксимация из [12]. На (а) и (г), синие открытые символы обозначают результаты работы [4], закрашенные черные результаты [11]. На рисунке (б), открытые синие символы результаты [8]. Фиолетовые закрашенные на всех рисунках результаты работы [10]. Остальные цветные символы соответствуют результатам настоящей работы полученными при разных скоростях ветра.

Была выполнена серия экспериментов на Ветро-волновом Теромостратифицированном Бассейне ИПФ РАН по изучению процессов обмена импульсом и теплом в устойчиво стратифицированном турбулентном пограничном слое воздушного потока над взволнованной поверхностью. Эксперименты были проведены в широком диапазоне скоростей ветра и параметров шероховатости (волн), включая экстремальные с интенсивным обрушением волн и образованием брызг. Для создания температурной стратификации приводного слоя ветра, воздух поступающий в канал воздух нагревался до 30-40° (в зависимости от скорости воздушного потока). Температура поверхности воды поддерживалась постоянной около 15°. Исследования



проводились в широком диапазоне скоростей ветра, соответствующих  $U_{10}$  от 10–37 м/с. Особенностью настоящего эксперимента являлось наличие возможности изменения характера поверхностного волнения независимо от скорости ветрового потока в канале. Для этого вдоль всего канала была натянута полиэтиленовая мелкая сетка толщиной 0.25 мм и ячейкой 1.6 x 1.6 мм. Эта сетка не влияла на теплообмен, зато характеристики поверхностного волнения менялись в зависимости от положения сетки: волны отсутствовали, когда сетка располагалась на уровне невозмущенной поверхности воды, и максимальная амплитуда при наибольшем заглублении сетки (50 см). Одновременные измерения профилей скорости ветрового и температуры потока в рабочей секции канала (на расстоянии 6,5 м от входа в канал) проводилось при помощи трубки Пито и датчика температуры. Оба датчика были закреплены на вертикальном сканирующем устройстве.

В результате измерений были получены профили средней скорости и температуры в рабочей секции канала (для дальнейшей обработки из температурных профилей была вычтена температура поверхностного водного слоя). В безразмерных переменных, связанных с максимумом скорости и температуры и толщиной погранслоя, дефекты профилей демонстрируют автомодельный характер. Поэтому, в соответствии с «законом следа», использовалась параболическая аппроксимация следной части профилей. По данной аппроксимации были определены значения величин скорости трения  $u^*$ , температурной шероховатости и констант в автомодельных зависимостях и доверительные интервалы их определения. Пользуясь ими, по логарифмической части профилей, были получены эквивалентная скорость ветра  $U_{10}$  и разница температуры  $\Delta T_{10}$ . В итоге были вычислены значения коэффициентов  $C_D$  и  $C_T$ . Построены зависимости коэффициентов от  $u^*$  и приведена зависимость  $U_{10}(u^*)$ , см. рис. 1.

Было продемонстрировано, что в отличие от турбулентного потока импульса (скорости трения) и коэффициента обмена импульсом, температурная шероховатость (поток тепла) и, соответственно, коэффициент обмена теплом слабо зависит от характеристик воздушного потока до начала обрушения волн и генерации брызг. Брызги, которые начинают генерироваться примерно после  $U_{10}$  равном 29 м/с и  $u^*$  1.5 м/с соответственно, приводят к сильному росту теплообмена, и тенденции к насыщению как у коэффициента обмена импульсом не наблюдается (см. рис. 1, а, б, в).

*Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 18-05-00265 и 18-05-60299.*

### **Литература / References:**

1. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B. Bulk parameterization of air–sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm // *J. Climate*. 2003. V. 16 (4). pp. 571–591.
2. Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Kandaurov A.A., Ezhova E.V., Zilitinkevich S.S. Momentum and buoyancy transfer in atmospheric turbulent boundary layer over wavy water surface Part 2: Wind–wave spectra // *Nonlinear. Geoph. Proc.* 2013. V. 20. pp. 841–856.
3. Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A, M.A. Vdovin, Kazakov V.I. Laboratory and theoretical modeling of air–sea momentum transfer under severe wind conditions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C00J21.
4. Donelan M.A., Haus B.K, Reul N., Plant W.J., Stiassnie M., Graber H. C., Brown O. B., Saltzman E. S. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L18306.
5. Ocampo-Torres F.J., Donelan M.A., Merzi N., Jia, F. Laboratory measurements of mass transfer of carbon dioxide and water vapour for smooth and rough flow conditions // *Tellus. Ser. B.* 1994. V. 46. pp. 16–32.
6. Brut A., Butet A., Durand P., Caniaux G., Planton S. Air–sea exchanges in the equatorial area from the EQUALANT99 dataset: Bulk parametrizations of turbulent fluxes corrected for airflow distortion // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2005. V. 131. pp. 2497–2538.

7. Drennan W.M., Zhang J., French J.R., McCormick C., Black P.G. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part II: Latent heat flux // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. pp. 1103–1115.
8. Jeong D., Haus B.K., Donelan M.A. Enthalpy Transfer across the Air-Water Interface in High Winds Including Spray // J. Atmos. Sci. 2012. V. 69. pp. 2733–2748.
9. French J.R., Drennan W.M., Zhang J.A., Black P.G. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part I: Momentum flux // J. Atm. Sci. 2007. V. 64 (4). pp. 1089–1102.
10. Komori S., Iwano K., Takagaki N., Onishi R., Kurose R., Takahashi K., Suzuki N. Laboratory measurements of heat transfer and drag coefficients at extremely high wind speeds // J. Phys. Oceanogr. 2018. V. 48 (4). pp. 959–974.
11. Powell M.D., Vickery P.J., Reinhold T.A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // Nature. 2003. V. 422 (6929). pp. 279–283.
12. Liu W.T., Katsaros K.B., Businger J.A. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface // J. Atmos. Sci. 1979. V. 36 (9). pp. 1722–1735.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОДЫ КОЛЛЕКТОРА НЕФТЕГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ИСТИННО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

**Ю.В. Сидорин<sup>1</sup>, Т.О. Чаплина<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,*

<sup>2</sup> *МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, chaplina\_to@inbox.ru*

В настоящее время нефтегазовая промышленность играет ключевую роль в экономике нашей страны. Одним из основных инструментов для обоснованного принятия стратегических и тактических решений при разработке месторождений углеводородов является моделирование процессов извлечения нефти и газа. Каждое месторождение уникально, неправильное применение тех или иных методов воздействия на пласт может привести к непоправимым последствиям для разработки.

Работа посвящена исследованию прочностных свойств породы коллектора газоконденсатного месторождения на установке истинно трехосного нагружения. Задача определения прочностных свойств пород, слагающих продуктивный пласт месторождения, приобретает особую актуальность для обеспечения устойчивости стволов дорогостоящих скважин, пробуренных на морском шельфе.

На сегодняшний день существуют различные методы исследования прочностных свойств горных пород. Наиболее распространенный метод связан с использованием установок Кармановского типа. Установка Кармановского типа является установкой условно трехосного нагружения, так как, несмотря на то, что нагружение производится по всей поверхности образца, контролировать и проводить изменения нагружения можно только по двум осям. Это происходит из-за того, что формой образца для установки является цилиндр и нагружение проводится только по двум составляющим нагружения: по вертикальной и по радиальной (рис. 1).

Наиболее полную информацию о свойствах горной породы дают исследования на установках истинно трехосного нагружения (УИТН), пока не получивших широкого распространения. В УИТН напряжения можно менять по всем трём осям независимо друг от друга и одновременно. Однако эта возможность обуславливает появление определенных трудностей при создании установки. Универсального решения создания таких установок нет до сих пор, поэтому в мире нет двух одинаковых УИТН.

Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН) – это уникальная экспериментальная установка, созданная в Институте проблем механики

РАН и предназначенная для изучения деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик пород нефтегазовых, рудных и угольных месторождений (рис. 2). ИСТНН позволяет нагружать образцы породы, представляющие собой кубики с гранью 40 или 50 мм, независимо по трем осям и определять проницаемость образца в ходе нагружения. Установка дает возможность воссоздавать в ходе опытов реальные напряженные состояния, возникающие в призабойной зоне пласта при бурении скважины, ее освоении и эксплуатации, и изучать их влияние на фильтрационные свойства породы.

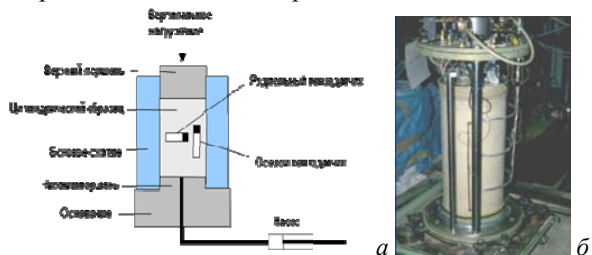


Рисунок 1. Установка Кармановского типа: а – схема; б – фото.



Рисунок 2. Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН).

В состав Испытательной системы входят:

- силовой агрегат – установка неравнокомпонентного трехосного нагружения (УНТН);
- маслонасосная станция;
- система автоматического измерения проницаемости;
- система автоматизированного управления (САУ), включающая информационно-измерительную систему.

В данной работе на установке ИСТНН проводились исследования образцов породы продуктивного пласта Киринского газоконденсатного месторождения, расположенного на шельфе Охотского моря, острова Сахалин (проект Сахалин-3). Было испытано 4 образца из коллектора месторождения. Образцы испытывались по программе, предусматривающей одноосное нагружение при различных уровнях бокового поджатия. Были проведены три цикла испытаний каждого образца. На каждом цикле образец сначала подвергался всестороннему сжатию до определенной величины (2 МПа, 10 МПа и 20 МПа), а затем одноосному сжатию по одной из осей до перехода деформирования образца в пластическую фазу. Кривые деформирования одного из образцов представлены на рис. 3, а – в. Для определения интересных констант на основе данных испытаний строились круги Мора - геометрическая интерпретация теории прочности Кулона-Мора, наиболее адекватно описывающей механическое поведение горных пород.

После получения кривых деформирования на каждом цикле для всех образцов по

минимальному и максимальному значениям главных напряжений строились круги Мора. Проводилась их огибающая (график зависимости предельного касательного напряжения от нормального). По построенному графику определялись коэффициент сцепления и угол внутреннего трения (рис. 3, з).

$$\tau = k + \sigma_n * tg(\varphi)$$

$\tau$  - предельное касательное напряжение,  $k$  - коэффициент сцепления,  $\varphi$  - угол внутреннего трения.

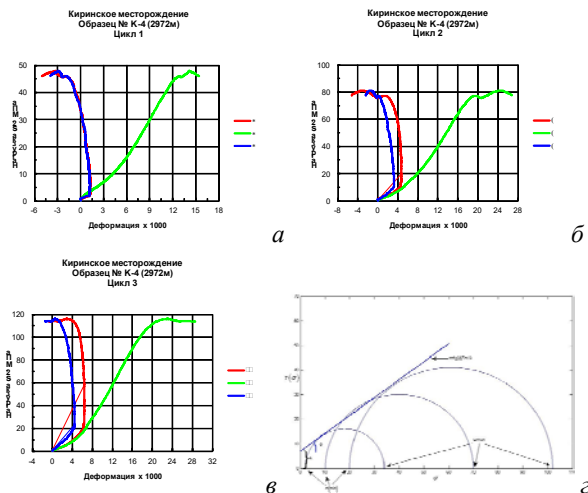


Рисунок 3. Кривые деформирования (а - в) и круги Мора (з) для образца Киринского газоконденсатного месторождения.

Таблица 1.

Номер образца	Коэффициент сцепления, МПа	Угол внутреннего трения, °
К-1	6.8	36.1
К-2	10.8	28.8
К-3	15.3	30.1
К-4	10.6	35.7

Значения углов внутреннего трения и коэффициентов сцепления говорят о том, что исследуемые породы являются породами малой твёрдости, но со значительной связью между частицами. Данные характеристики входят в геомеханическую модель месторождения. На ее основе создается проект разработки месторождения, который включает параметры бурения и режим эксплуатации скважин.

Авторы признательны Российскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку (грант РФФИ–Урал № 17–41–590148).





линейным уравнением состояния:  $\rho = \rho_0 + \alpha \rho_c$ , где  $\rho_0$  – плотность чистой воды,  $\alpha = 0.64$  – константа. Значения  $\rho_0$ ,  $k$ ,  $\phi$ ,  $\mu$ ,  $D$  считаются постоянными. Скорость фильтрации  $\mathbf{u} = (u, v)$  находится по скорости движения жидкости  $\mathbf{U} = (U, V)$ :  $\mathbf{u} = \phi \mathbf{U}$ . Определяется безразмерная плотность  $S = \rho_c / \rho_c^*$  и связанная с ней концентрация (массовая доля) примеси  $c = \rho_c / \rho$ :  $c = S c^* / (1 - \alpha c^* (1 - S))$ . Верхний индекс «\*» соответствует насыщенному раствору, концентрация насыщения  $c^* = 0.265$ .

В начальный момент пористая область заполнена раствором концентрации  $c_0$ , который движется вверх равномерно и прямолинейно со скоростью  $V_0$ . Вода со скоростью  $V_0$  выходит через верхнюю границу. Для примеси эта граница непроницаема: поступление примеси к верхней границе с потоком воды, равно ее диффузионному оттоку от границы.

Система уравнений (1)-(3) вместе с начальными и граничными условиями, преобразованная к безразмерному виду, решается численно с использованием конечно-разностного метода [7, 8].

На динамику системы наиболее существенно влияют параметры, меняющиеся в широком диапазоне: проницаемость среды  $k$  ( $k \in [10^{-17} + 10^{-12}] \text{ м}^2$ ), начальная концентрация  $c_0$  ( $c_0 \in [10^{-4} + 5 \cdot 10^{-2}]$ ) и скорость движения раствора  $V_0$  ( $V_0 \in [0 + 10^{-6}] \text{ м/с}$ ). Определяющие безразмерные параметры

$$Ra^* = \frac{kg(\rho^* - \rho_0)}{\phi \mu V_0}, \quad Pe = \frac{V_0 V_0}{D}, \quad c_0 \quad (4)$$

включают числа Рэлея-Дарси (для насыщенного раствора)  $Ra^*$  и Пекле  $Pe$ .

Получено, что в грунтах низкой проницаемости при  $k \leq 10^{-18} \text{ м}^2$  может формироваться устойчивый профиль концентрации примеси: устанавливается стационарное вертикальное распределение соли с монотонным возрастанием концентрации в направлении к верхней границе; в этом случае конвективный и диффузионный типы массопереноса уравниваются друг друга. При возрастании  $c_0$  или  $V_0$  состояние системы может стать неустойчивым, что приводит к развитию конвекционно-конвективного движения. Как правило, формируется крупномасштабная периодическая конвективная структура, заполняющая всю пористую область; со временем движение становится стационарным. Граница устойчивости определяется как  $Ra^* K Pe \approx 22.5$ , где коэффициент  $K \in [0 + 1]$  зависит от установившейся на фронте фазового перехода концентрации  $c^*$ .

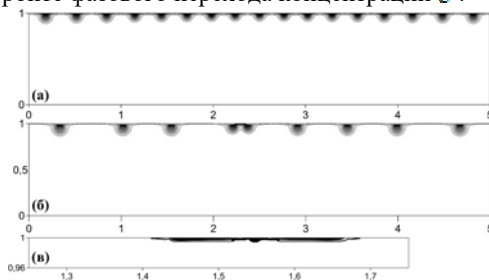


Рисунок 2. Изолинии концентрации примеси в безразмерные моменты времени  $t = 24$  (а), 40 (б). Фрагмент (б): светло-серые зоны на верхней границе – отложение солей. Фрагмент (в): изолинии концентрации выпавшей соли в увеличенном масштабе в момент времени  $t = 40$ .

Для грунтов высокой проницаемости при  $k \geq 10^{-14} \text{ м}^2$  наряду с описанными режимами характерно также образование мелкомасштабной структуры солевых «капель». Движение, которое все время остается нестационарным и стохастическим,

сосредотачивается около верхней границы, образуя каплеобразные области концентрированного раствора. Раствор может пересыщаться, что ведет к выпадению соли в осадок.

Выполнено численное моделирование в области  $10 \times 2 \text{ м}^2$  при физических параметрах:  $k = 10^{-13} \text{ м}^2$ ,  $\rho^s = 3.19 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_0 = 1.0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\phi = 0.3$ ,  $\mu = 1.0 \cdot 10^{-8} \text{ Па с}$ ,  $D = 1.6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ ,  $H_y = 2 \text{ м}$ ,  $V_0 = 5.0 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$ ,  $c_0 = 1.0 \cdot 10^{-4}$ . Системе соответствуют безразмерные параметры:  $Ra^s = 13.36$ ,  $Pe = 62.5$ . На рис. 2 показана картина течения в два момента времени; масштаб времени  $H_y/V_0$ . Видно, что около верхней границы образуются солевые «капли», расположенные сначала периодически (а). Со временем «капли» становятся крупнее, перемещаются, сливаются, структура конвекции становится нерегулярной (б). Через некоторое время после начала конвекции раствор около верхней границы становится пересыщенным и соль начинает выпадать в осадок. Показано, что отложение твердой соли растягивается вдоль границы фазового перехода, наибольшее количество примеси выпадает в центре отложения (в).

*Автор благодарит Г.Г. Цыпкина за полезные обсуждения. Работа частично поддержана грантом РФФИ*

*№ 15-08-01365 и средствами государственного бюджета по госзаданию № АААА-20-120011690131-7.*

### **Литература / References:**

1. Il'ichev A.T., Tsytkin G.G., Pritchard D., Richardson Ch.N. Instability of the Salinity Profile during Evaporation of Saline Groundwater // J. Fluid Mech. 2008. V. 614. pp. 87–104.
2. Soboleva E.B., Tsytkin G.G. Numerical Simulation of Convective Flows in a Soil during Evaporation of Water Containing a Dissolved Admixture // Fluid Dyn. 2014. V. 49(5). pp. 634–644.
3. Soboleva E.B., Tsytkin G.G. Regimes of Haline Convection during the Evaporation of Groundwater Containing a Dissolved Admixture // Fluid Dyn. 2016. V. 51(3). pp. 364–371.
4. Soboleva E. Numerical Investigations of Haline-Convective Flows of Saline Groundwater // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. pp. 012104.
5. Nield D., Bejan A. Convection in Porous Media. New York, Springer, 2006.
6. Bear J., Cheng A. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. New York, Springer, 2010.
7. Соболева Е.Б. Метод численного исследования динамики соленой воды в почве // Матем. Моделир. 2014. Т. 26(2). С. 50–64.
8. Soboleva E.B. A method for Numerical Simulation of Haline Convective Flows in Porous Media Applied to Geology // Comput. Math. Math. Phys. 2019. V. 59 (11). pp. 1893–1903.



---

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ОКЕАНОГРАФИИ**

***В.А. Соколов***

В докладе приводятся основные положения теории неравновесных диссипативных термодинамических систем [1-4], на основе которых формируются ответы на вопросы, которые не могут быть получены в системе существующих в океанографии положений. К таким вопросам относятся:

- высокие значения положительных корреляций (более 0.75) в изменениях температуры -Т и солёности-S морской воды;
- функциональное предназначение морских водных масс;
- стабильность во времени и пространстве Т-S диаграмм;
- самоорганизация термодинамических процессов в морских водах (синергетика)

морских вод) [5].

Приводится пример использования, введённого в этой теории принципа минимального производства энтропии, для получения в рамках диагностических расчётов полей температуры  $-T$ , солёности-  $S$  и плотности морских вод  $-\rho$  (интерполяция дискретных значений полей  $T, S, \rho$ ) взаимосогласованных решений этой нелинейной задачи, основанных на учёте реальных статистических распределения этих полей, которым соответствуют вероятные значения морских данных.

#### **Литература / References:**

1. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
2. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
3. Пригожин И.Р., Кондипуди Д. Современная Термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.
4. Prigogine I.R. The End of Certainty: Time, Chaos, and the New Laws of Nature. Free Press, 1997.
5. Соколов В.А. Закономерности и свойства совместных статистических распределений термохалинных полей Северной Атлантики и их использование в решении океанографических задач // Процессы в геосредах. 2016. №3. С. 267–277.



---

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНОЙ СТАТИСТИКИ МОРСКИХ ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ, ПРОТИВОРЕЧАЩИЕ СУЩЕСТВУЮЩИМ МЕТОДАМ РАСЧЁТОВ ЭТИХ ПОЛЕЙ**

*В.А. Соколов*

Исследуются ограничения, вводимые на описание статистики полей температуры  $-T$  и солёности  $-S$  (термохалинных полей), используемые в методах пространственной интерполяции  $T, S$  по данным их дискретных значений [1, 2] и модельным расчётам  $T, S$ , основанных на решениях осреднённых, по правилам Рейнольца, уравнений сохранения импульса, массы, тепла и соли морских вод [3]. В аксиоматике методов обоих направлений используется ограничение на статистику  $T, S$  полей, связанное с их описанием нормальным законом [4], что в открытых частях морей и океанов противоречит их природе [5, 6]. Исследуется значимость такого ограничения и показываются его противоречие присутствию в морских полях объёмных структурных образований - водных масс (ВМ) [7, 8]. Описывается связь этого свойства морских полей с теорией открытых неравновесных термодинамических систем [9, 10], где ВМ представляют аналог диссипативных структур, обеспечивающих стабилизацию процессов в этих системах за счёт обмена энергией с внешней средой. Отрицательный эффект исследуемых ограничений демонстрируется на примере пропуска в результатах обработки данных наблюдений температуры поверхности Чёрного моря (ЧМ) [11] климатического потепления на величину около двух градусов. Этот результат, полученный в обработке климатических спутниковых наблюдений на интервале 1990-2014 гг [12], подтвержден наблюдениями на береговых гидрологических постах ЧМ [13,14] и результатами анализа климатических изменений атмосферных процессов в регионе ЧМ [15]. Приводится эмпирическое доказательство связи отмеченного дефекта в расчётах климатических изменений температуры ЧМ с гипотезой описания статистики температуры поверхности ЧМ нормальным законом.

#### **Литература / References:**

1. Гандин Л.С. Метод оптимальной интерполяции метеорологических полей. Л., Гидрометеиздат, 1963.



283 с.

2. Фортус М.И. Метод эмпирических ортогональных функций и его применение в метеорологии // Метеорол. Гидрол. 1980. №4. С. 113–119.
3. Саркисян А.С. Моделирование динамики океана. С-Пб.: Гидрометеоздат, 1991. 295 с.
4. Венцель Е.С. Теория вероятности. М.: Высшая школа, 1999. 578 с.
5. Соколов В.А., Апухтина С.П. «Статистическая модель климатических состояний термохалинических полей Северной Атлантики и возможности её практического использования в океанографических исследованиях» // Тр. ГОИН. Вып. 212. 2009. С. 48–63.
6. Соколов В.А. Закономерности и свойства совместных статистических распределений термохалинных полей Северной Атлантики и их использование в решении океанографических задач // Процессы в геосредах. 2016. № 3. С. 267–277.
7. Добровольский А.Д. Об определении водных масс // Океанол. 1961. Т. 1 (1). С. 12–24.
8. Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеоздат, 1957. 296 с.
9. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
10. Пригожин И., Кондипуди Д. Современная Термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.
11. Белокопытов В.А. Климатические изменения гидрологического режима Чёрного моря // Реф. Соиск. уч. ст. д. геогр. н. Севастополь, 2017.
12. Спутник MODIS AQVA 1990-2014
13. Ильин Ю.П., Репетин А.Н. Климатические изменения гидрометеорежима северной и восточной частей Чёрного моря // МГИ. 2011. Т. 1. Вып. 25. С. 157–168.
14. Мельников В.А., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. Гидрофизический полигон на Чёрном море // Тр. ГОИН. 2011. Вып. 213. С. 264–278.
15. Кононова Н.К. Циркуляция в атмосфере как фактор стихийных бедствий на Северном Кавказе в XXI веке. М.: Инст. Геог. РАН, 2012. С. 72–103.



## КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА РАСЧЁТОВ МОРСКИХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

*В.А. Соколов В.А., К.В. Показеев*

Морские поля температуры –  $T$ , солёности –  $S$ , плотности –  $\rho$ , характеризуются сложными нелинейными взаимозависимостями и имеют много модальные формы их совместных статистических распределений [1-3] в условиях, когда в районах морских исследований присутствует несколько водных масс [1–5]. Вместе с тем, учёт этих важных факторов, характеризующих специфику морских гидрологических скалярных полей  $T$ ,  $S$ ,  $\rho$  (далее МГСП) не учитывается в методах расчёта этих полей, как в их диагностической постановке (интерполяция дискретных значений МГСП) [6, 7], так и в моделях их прогностических расчётов типа [8]. Последние методы сводятся к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных с заданием для входящих в эти уравнения неизвестных соответствующих начальных и граничных условий. Уравнения, образующие в эти системы, подвергались процедуре усреднения в пространстве, времени и по статистике входящих в них неизвестных [9]. Несмотря на отсутствие при разработке указанных методов расчётов МГСП учёта перечисленных выше важных свойств этих полей, указанные методы до сих пор активно используются в прогностических и диагностических расчётах МГСП. Такое состояние морских исследований оказалось возможным из-за отсутствия количественных критериев качества расчётных значений исследуемых полей. Предлагаемый доклад направлен на исправление этого недостатка. В нём предлагается система количественных критериев МГСП, основанная на привлечении к тестированию полученных результатов

общеизвестных в океанологии свойств морских полей. К ним относятся:

- существование в МГСП водных масс (ВМ) [4], каждой из которых соответствует своя статистическая мода, а так же консерватизм этих образований во времени и пространстве на исследуемых гидрологических горизонтах [1–5];

- T-S диаграммы и консерватизм в сохранении формы их распределений по вертикали [5], проявляемы в постоянстве количества T-S экстремумов и положения их максимумов по вертикали в районах проводимых исследований;

- соответствие форм статистики рассчитанных морских полей природным аналогам их статистических распределений, прежде всего, в зонах гидрологических фронтов, где средние значения искомым неизвестных, в силу бимодальности их статистики в этих зонах, не имеют физического смысла [1-3].

Применение этих критериев к полученным расчётным значениям МГСП исключает из рассмотрения подавляющее большинство таких расчётов, освобождая исследователей от анализа результатов, аналоги которых отсутствуют в природе.

### **Литература / References:**

1. Соколов В.А. Применение совместного статистического анализа термохалинных и плотностных полей для фильтрации и представления свойств массивов данных морских гидрологических наблюдений // В сб. «Сообщения по прикладной математике» ВЦ им. Дородницына РАН. М., 2005.
2. Соколов В.А. Закономерности и свойства совместных статистических распределений термохалинных полей Северной Атлантики и их использование в решении океанографических задач // Процессы в геосредах. 2016. №3. С. 267–277.
3. Соколов В.А., Показеев К.В. Свойства совместной статистики температуры, солёности, плотности морских вод и возможности их использования в океанографических исследованиях // Процессы в геосредах. 2018. № 4. С. 1192–1197.
4. Добровольский А. Д. Об определении водных масс // Океанол. 1961. Т. 1 (1). С. 12–24.
5. Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 296 с.
6. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидромет., 1976. 360 с.
7. Обухов А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Изв. АН СССР. Сер. Геофизич. 1960. № 3. С. 432–439.
8. Саркисян А.С. Моделирование динамики океана. С-Пб.: Гидрометеиздат, 1991. 295 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 1, 2. М.: Наука, 1988.



---

## **НЕЙРОННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АНОМАЛИИ ОСРЕДНЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА**

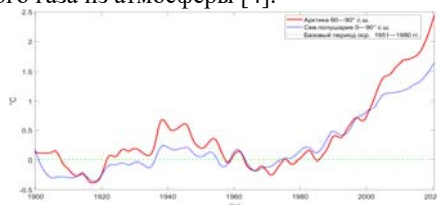
*Д.А. Соловьев<sup>1</sup>, Л.В. Нефедова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Институт океанологии имени П.П. Ширинова РАН, Москва, solovev@ocean.ru*

<sup>2</sup> *МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, nefludmila@mail.ru*

Арктический регион играет ключевую роль и является индикатором глобальных природных изменений, в особенности изменения климата [1]. Наблюдаемые изменения в Арктике, такие как повышение температуры воздуха, сокращение ледяного покрова, увеличение стока рек и деградация многолетней мерзлоты, уже показывают, что на территории Арктики происходят самые большие изменения по сравнению с другими регионами Земли [2]. Важную роль в понимании скрытых механизмов климатических процессов в Арктике играют климатические обратные связи. Они могут быть обусловлены не только крупномасштабными синоптическими и гидрологическими процессами, но и региональными особенностями, характерными для Арктики [3].

Процессы потепления климата на планете идут уже на протяжении трёхсот лет. Наблюдаемые глобальные изменения климата связывают с ростом концентрации в атмосфере парниковых газов: углекислого газа, метана, закиси азота. По мнению учёных, это началось с середины XVIII в., вместе с индустриальной эпохой, которая сопровождалась сжиганием углеводородов и сокращением лесов – естественных поглотителей углекислого газа из атмосферы [4].



*Рисунок 1. Динамика ежегодного отклонения от средней температуры воздуха (регион Арктики; глобальная температура) [4].*

Считается, что наблюдаемое в последние десятилетия ускорение процесса потепления тоже связано с деятельностью человека. При этом ожидаемая скорость потепления в Арктике будет в два раза выше по сравнению со среднемировой [14].

График, показанный на рис. 1 позволяет отследить величину отклонения от средней температуры за каждый год начиная с 1900 по 2020 гг. Красная линия указывает на арктические температуры, а синяя линия указывает на глобальные температуры для Северного полушария Земли. На протяжении большей части наблюдений арктические аномалии колебались как выше, так и ниже среднего глобального значения из-за естественной изменчивости, но после 2000 г. арктические температуры остаются неизменно выше среднего глобального значения. Многолетняя повторяемость аномального потепления в Арктическом регионе начиная с 2014 г. не похожа ни на один другой зарегистрированный период.

В качестве исходной информации для оценки, представленной на рис. 1 динамики ежегодного отклонения от средней температуры воздуха использовались значения температуры воздуха у поверхности Земли (ТВ), синтезированные в NASA Goddard Institute of Space Science (NASA GISS) в рамках уникального проекта Berkeley Earth Surface Temperature (BEST). Указанные данные находятся в свободном доступе на сайте <http://berkeleyearth.org/data/>. В качестве базового периода осреднения для оценки аномалий температуры воздуха использовался период 1951—1980 гг., методология и алгоритмы обработки данных и контроля их качества на всех этапах описаны в [5].

Важно отметить, что особенностью потепления было то, что в высоких полярных широтах Северного полушария оно было выражено более чётко и ярко. Так, в Западной Гренландии температура повысилась на 5°C, а на Шпицбергене даже на 8-9°C за период от 1912—1926 гг. до конца 30-х годов. Наибольшее глобальное повышение средней температуры у поверхности Земли во время кульминации потепления составляло 0.6°C [6]. Арктику образно называли «кухней погоды» [7]. После 40-х гг. стала проявляться тенденция к похолоданию. Льды в Северном полушарии стали снова наступать. В первую очередь это выразилось в росте площади ледяного покрова Северного Ледовитого океана. С начала 40-х и до конца 60-х гг. площадь льда в арктическом бассейне возросла на 10%. Первое потепление сменилось непродолжительным и несильным похолоданием в середине XX в. С середины 1970-х гг. началось второе за историю инструментальных наблюдений глобальное потепление, которое получило совсем иную трактовку, связанную с усилением парникового эффекта от

антропогенного повышения концентрации углекислого и других парниковых газов в атмосфере. В июле 2020 г. значение аномалии средней годовой температуры воздуха в Арктическом регионе достигла своего максимума за все историю наблюдений – 2.446 °С, что подтверждает фактические данные о беспрецедентном ускорении потепления климата Арктики в последние годы [8].

Прогноз динамики потепления в Арктическом регионе имеет значительное влияние на хозяйственную деятельность, транспортный и углеводородный сектор экономики. Многие отрасли промышленности в значительной степени зависят от погодных условий. На макроуровне прогнозирование погоды обычно выполняется с использованием данных, собранных спутниковыми системами дистанционного зондирования. Погодные параметры, такие как максимальная температура, минимальная температура, количество осадков, условия облачности, скорость и направление ветра прогнозируются с использованием данных, полученных метеорологическими спутниками. Спутниковые системы наблюдения способны предоставлять информацию, которая характеризует большую географическую область. Переменные, определяющие погодные условия, такие как температура, относительная влажность, количество осадков и т. д., непрерывно изменяются во времени, образуя временные ряды. Они могут использоваться для разработки модели прогнозирования либо статистически, либо с использованием других средств [9]. Для моделирования межгодового хода аномалии средней годовой температуры воздуха, осредненной для широтной зоны 60—90° с.ш., были использованы искусственные нейронные сети (НС) — математические модели, позволяющие реализовать искусственный интеллект. Принцип работы искусственных НС подобен принципу обработки сигналов в нейронах живых существ.

Для прогнозирования аномалии осредненной температуры воздуха для арктического региона был реализован нейросетевой алгоритм в программной среде STATISTICA Automated Neural Networks (Автоматизированные нейронные сети) на основе многослойной архитектура нейронной сети с обратным распространением ошибки (рис. 2). Преимуществом используемой среды моделирования состоит в том, что, в данных программных продуктах существует возможность «подмешивания» других параллельных входов, тем самым учитывая влияние коррелированных процессов.

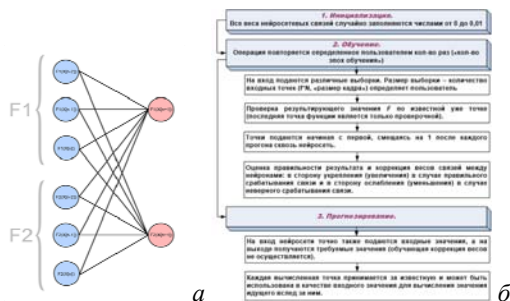


Рисунок 2. Описание структуры нейросети (а), алгоритм обучения нейронной сети (б).

Нейроны входного, скрытого и выходного слоёв представлены сигмоидальной биполярной функцией [10]:

$$F(x) = \tanh(\beta x)$$

Ее производная — деактивационная функция — используется для формирования целевой функции и отображения результата. В качестве входных параметров был

использован набор индексов дальнедействующих сигналов в системе океан — атмосфера. Обучение модели проводилось на основе алгоритма обратного распространения ошибки. Схема модели приведена на рис. 2.

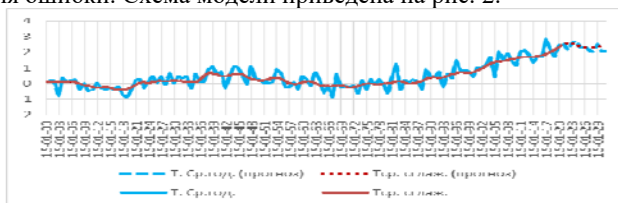


Рисунок 3. Нейросетевой прогноз межгодового хода аномалии среднегодовой и среднемесячной температуры воздуха (°C), осредненной для широтной зоны 60 – 90° с.ш. Источник: расчеты авторов.

Ряд значений моделируемого параметра был разделен на обучающую, тестирующую (тестовую) и контрольную выборки. На обучающей выборке проводилось обучение модели, на тестовой — проверка результата моделирования. Для обучения НС выбран 20-летний период первого потепления с 1920 по 1940 г., для теста — 20-летний период второго потепления с 1980–2000 гг. Контрольная выборка не использовалась в моделировании и нужна была для того, чтобы независимо оценить воспроизводимость сложных явлений моделью. В качестве контрольной выборки рассматривался период 2000–2015 гг. На заключительном этапе экспертным путем отбиралась наилучшая из нескольких конструкций НС, выбранных программой на основе условия максимума обучения, описанного в работе.

На рис. 3 показаны результаты нейросетевого моделирования межгодового хода аномалии средней годовой температуры воздуха (°C), осредненной для широтной зоны 60—90° с.ш. за период 15.07.2020 – 15.07.2030 гг. Прогноз выполнен для сглаженных значений среднегодовых (синяя пунктирная линия) и среднемесячных (красная точечная линия) значений аномалии средней годовой температуры воздуха. Из анализа полученных рядов данных аномалий температуры следует, что ее максимальные значения будут достигнуты в середине 2022 г. и составят величину около 2.6 °C, а затем будет наблюдаться понижающийся тренд.

Полученные результаты показывают хорошую прогностическую способность НС, по крайней мере, на тестовых выборках. Приведенные данные позволяют строить долгосрочный прогноз аномалии температуры воздуха с достаточной точностью. Можно предположить, что для адекватной работы нейронной сети необходимо периодически проводить её переобучение с учетом «подмешивания» других параллельных входов (в т.ч. климатические колебания, характеризующие обратные связи, которые обусловлены процессами обмена энергией на границе океан-атмосфера), тем самым учитывая влияние коррелированных процессов. Такая схема переобучения достаточно легко может быть реализована с использованием технологий облачных сервисов и интернета вещей.

*Результаты исследований получены при финансовой поддержке РФФИ (научный проект 18-05-60252).*

### Литература / References:

1. Добролюбов С.А. Глобальная циркуляция вод океанов // Изв. РАН. Сер. Географ. 2005. № 1. С. 33–41.
2. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. № 6(2). С. 66–79.
3. Соловьев Д.А. Современные изменения климата в Арктике: причины и экологические последствия //

- Всерос. Конф. Межд. уч. II Юдахинские чтения «Проблемы обеспечения экологической безопасности и устойчивое развитие арктических территорий». 2019. С. 152–156.
4. Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. Глобальное потепление продолжается // Вестник РАН. 2008. № 1(78). С. 20–27.
  5. Rohde R., Muller R., Jacobsen R., Perlmutter S., Rosenfeld A., Wurtele J., Curry J., Wickham C., Mosher S. Berkeley Earth Temperature Averaging Process // Geoinf. Geostat.: An Overview. 2013. № 2(1). DOI 10.4172/gigs.1000103
  6. Шерстюков Б.Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // Арктика и север. 2016. № 24. С. 39–67. DOI 10.17238/issn2221-2698.2016.24.39
  7. Вакуленко Н.В., Нигматулин Р.И., Сонечкин Д.М. К вопросу о глобальном изменении климата // Метеорол. гидрол. 2015. № 9. С. 89–97.
  8. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic climate system and its global influences - Overview of GRENE Arctic climate change research project (2011–2016) // Polar Sci. 2020. С. 100548. DOI 10.1016/j.polar.2020.100548
  9. Кузнецов Б.Ф. Краткосрочное прогнозирование температуры на основе нейронных сетей // Актуальные вопросы аграрной науки. 2019. № 30. С. 59–65.
  10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Изд. дом Вильямс, 2008.



## ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ АНОМАЛИЙ НА СНИМКАХ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ, ОСНОВАННАЯ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛЕЙ ГЕОМЕТРИИ АНОМАЛИЙ

*В.И. Тимонин<sup>2</sup>, В.Н. Носов<sup>1</sup>, Н.В. Варганов<sup>1</sup>, Н.К. Косакян<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского, Москва

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, viktor\_nosov@mail.ru

В работе приведен статистический метод обнаружения проявлений следа судна на снимках морской поверхности. Метод основан на анализе корреляционных связей градиентов интенсивностей цветов ( $R, G, B$ ) в различных направлениях на снимках морской поверхности (МП). Показано, что боковые составляющие следа судна соответствуют различным кластерам, образованными значениями коэффициентов корреляции между этими градиентами. Получен алгоритм выделения следа, основанный на его геометрической структуре и позволяющий оптимизировать время его обнаружения. Действенность метода проиллюстрирована примером.

**Описание проблемы.** Анализ и обработка аэрокосмических снимков базируются на комплексном использовании различных методов анализа многомерных данных – кластерного анализа, дискриминантного анализа, спектрального анализа и других методов [1–6]. В последнее время начал широко применяться аппарат нейронных сетей, как мощное средство автоматизации процесса принятия решений [7–9].

В [10, 11] был предложен метод обнаружения следа судна на снимках морской поверхности, основанный на сравнении корреляционных характеристик градиентов интенсивностей цветов ( $R, G, B$ ) на отдельных фрагментах снимка  $\Delta_{ij}, i=1, n, j=1, m$  (размером  $N=ks$  пикселей каждый) с их значениями по всему снимку. В качестве статистических характеристик предлагалось использовать коэффициенты корреляции  $r(\text{grad } X(\alpha), \text{grad } X(\beta)) = r(\alpha, \beta)$  градиентов показателя  $X$  (скоростей изменения  $X$ ) в направлениях, составляющих углы  $\alpha, \beta$  с фиксированной осью (например, горизонтальной осью снимка). Для краткости изложения под градиентом понимается производная по соответствующему направлению (то есть скаляр). В качестве функционала сравнения коэффициентов корреляции  $r_{ij}(\alpha, \beta)$  и  $\bar{r}(\alpha, \beta)$  соответственно

на фрагменте  $\Delta_{ij}$  и снимке  $\Delta$  в направлениях  $\alpha, \beta$  использовалась статистика

$$Z_{ij}(\alpha, \beta) = \frac{\text{Arth}(\bar{r}(\alpha, \beta)) - \text{Arth}(r_{ij}(\alpha, \beta))}{1/\sqrt{N-3}}, \quad (1)$$

где  $\text{Arth}(x) = 0.5 \ln((1+x)/(1-x))$  - арктангенс гиперболический  $x$ .

На рис. 1, а показана усредненная структура следа судна с параметрами, слабо зависящими от его скорости (углом между боковыми линиями следа, углами наклона продольных волн к оси следа, длинами продольных и поперечных волн). На основе этой модели метод идентификации боковых линий следа основывался на выделении фрагментов снимков с наибольшими по модулю значениями статистики (1) по всем возможным парам направлений, показанным на рис. 1, б. В качестве примера адекватности метода на рис. 1в и рис. 1, г показаны соответственно тестовый снимок морской поверхности и инфограмма значений (1) для фиксированной пары направлений  $\alpha = 26^\circ, \beta = 180^\circ$  (здесь и далее углы отсчитываются от положительного направления оси абсцисс). На рис. 1, г четко идентифицируется левая боковая линия следа судна. Вместе с тем описанная процедура идентификации имеет существенные недостатки.

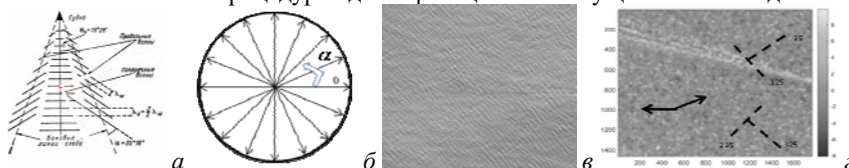


Рисунок 1. Структура следа судна - а; б) поле направлений градиентов; в) тестируемый снимок МП; г) инфограмма для снимка МП при  $\alpha = 26^\circ, \beta = 180^\circ$ .

Во-первых, она предусматривает перебор всех возможных пар углов  $(\alpha, \beta)$  при вычислении значений статистики (1), что требует большое время анализа. Во-вторых, невозможно провести сравнение самих коэффициентов корреляций для разных фрагментов в различных направлениях. Ниже предложен статистический анализ структуры следа судна, основанный на сравнении самих коэффициентов корреляций градиентов фрагментов снимка, позволяющий уменьшить количество пар  $(\alpha, \beta)$  направлений, необходимых для идентификации аномалий.

**Замечание 1.** В приведенных ниже инфограммах тестового снимка светлые области соответствуют экстремальным положительным значениям корреляций, темные области – их экстремальным отрицательным значениям.

**Замечание 2.** В дальнейшем единичные векторы в направлении углов  $(\alpha, \beta)$  будут обозначаться соответственно  $\vec{v}(\alpha), \vec{v}(\beta)$ .

**Метод анализа снимков МП.** На рис. 2 показан элемент левой боковой линии следа при направлениях градиентов  $\alpha = 0^\circ, \beta = 116^\circ$ . Ось следа направлена по горизонтали. В соответствии с параметрами следа судна (рис. 1а) пунктиром указаны продольные волны, визуально представляющие собой чередующиеся с определенным периодом светлые и темные полосы. Нормаль к продольным волнам обозначена через  $\vec{n}$ . Для различных комбинаций направлений  $(\alpha, \beta)$  анализировались особенности корреляционных картин в зависимости от взаимного расположения векторов  $\vec{n}, \vec{v}(\alpha), \vec{v}(\beta)$ .

При анализе тестового снимка было обнаружено, что наиболее значимые аномальные проявления отмечались в случае, если направления  $\vec{v}(\alpha), \vec{v}(\beta)$  были близки к направлению нормалей к продольным волнам следа. Кроме того, в этом случае наблюдается эффект «расщепления» боковой волны на 2 составляющих – одна с



аномально отрицательными корреляциями скоростей, другая – аномально положительными корреляциями. В качестве примера на рис. 3 приведена инфограмма корреляционной картины снимка при  $(\alpha, \beta) = (45, -64)$ . Вектор  $\vec{v}(45)$  составляет небольшой угол порядка  $10^\circ$  с нормалью  $\vec{n}$  к продольным волнам левой боковой линии следа. На этой линии четко прослеживается расщепление левого «боковика» на две составляющие.

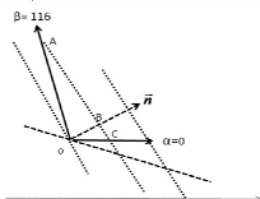


Рисунок 2. Схема элемента левой боковой линии следа при  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 116^\circ$  при горизонтальном положении оси следа.

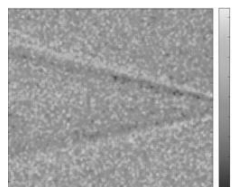


Рисунок 3. Инфограмма значений  $r_{ij}(45, -64)$ .

Для оптимизации количества анализируемых пар  $(\alpha, \beta)$  были проведены расчеты для 8 пар направлений, образующих развернутые углы в  $180^\circ$ , приведенные Табл. 1.

На рис. 4 представлены инфограммы корреляционных картин снимка для четырех выбранных направлений.

Таблица 1. Значения направлений развернутых углов (в град.)

$\alpha$	90	116	135	154	180	206	225	244
$\beta$	-90	-64	-45	-26	0	26	45	64

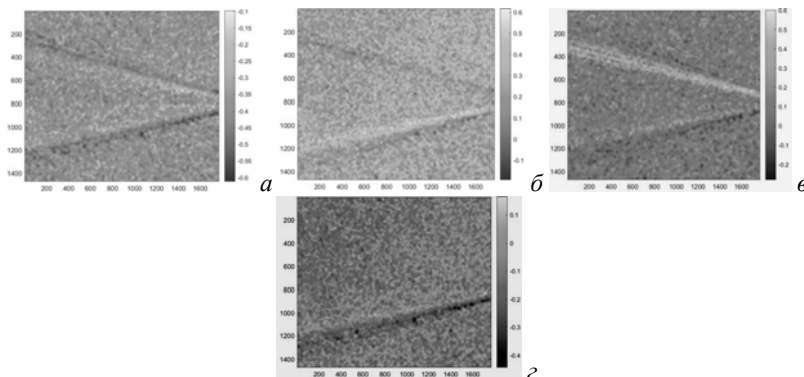


Рисунок 4. Инфограмма значений а)  $r_{ij}(90, -90)$ , б)  $r_{ij}(116, -64)$ , в)  $r_{ij}(-45, 135)$ , г)  $r_{ij}(244, 64)$ .

Анализ инфограмм подтверждает предположение о том, что расщепление бокового следа в наибольшей степени проявляется в случае, когда один из векторов  $\vec{v}(\alpha), \vec{v}(\beta)$  коллинеарен нормальному вектору  $\vec{n}$  к продольным волнам соответствующего бокового следа.

В Табл. 2 помещены характеристики корреляционных картин для четырех выбранных углов, в которой через  $\gamma(\alpha), \gamma(\beta)$  обозначены углы между продольными волнами изогона и левого боковых следов и направлениями  $(\alpha, \beta)$  соответственно.



Таблица 2. Корреляционные характеристики градиентов яркости для развернутых углов.

Углы $\alpha, \beta$	$\gamma(\alpha)$	$\gamma(\beta)$	Корреляция и правого бокового следа	Корреляция и левого бокового следа	Наличие расщепления структуры аномалии	Интервал корреляций на всем снимке	Среднее фоновое значение корреляций
-90, 90	+35	- 35	Миним. $\rho = -0.6$	Миним. $\rho = -0.5$	Слабо выражено	[- 0.6; -0.1]	<b>- 0.3</b>
-64, 116	+61	- 9	Макс. $\rho = -0.6$	Слабая миним. $\rho = -0.1$	Сильно выражено	[-0.18; 0.6]	<b>- 0.3</b>
-45, 135	+80	+10	Миним. $\rho = -0.45$	Отсут.	Сильно выражено	[-0.45; 0.15]	<b>- 0.1</b>
64, 244	189	119	Миним. $\rho = -0.5$	Макс. $\rho = 0,15$	Слабо выражено	[-0.25; 0.6]	<b>- 0.15</b>

Важной задачей идентификации аномалии как следа судна является соответствие обнаруженной аномалии признакам следа. Выше уже отмечалось, что одним из таких признаков может являться расщепление боковых линий следа на две составляющих – областей положительных и отрицательных корреляций. Не менее важным признаком является симметрия боковых линий следа относительно его оси.

Проверка симметрии должна основываться на симметричности какого-то числового (или векторного) показателя обнаруженных аномалий. Предлагается двумерный показатель, основанный на симметрии интервалов изменения корреляций для совокупности развернутых углов. Ниже приведено его качественное описание. В Табл. 2 помещены характеристики корреляционных картин для всех развернутых углов. Одной из них является интервал значений корреляций для этих картин.

На рис. 5 изображены 2 графика – минимальных и максимальных значений корреляций для каждого развернутого угла. По оси абсцисс отложены направления  $\alpha$ . Пунктирной вертикальной линией отмечен интервал корреляций, соответствующий горизонтальному развернутому углу. Наблюдается симметрия изменения как минимальных, так и максимальных значений коэффициентов корреляции относительно центра. Уточним, что относительно любого другого угла симметрия нарушается.

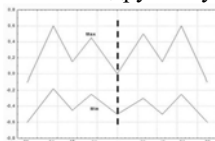


Рисунок 5. Симметрия границ корреляций яркостей относительно горизонтальной оси.

### Литература / References:

1. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2008. 264 с.
2. Шовенгердт Р. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
3. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С. и др. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
4. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1070 с.
5. Ahmed N. Recent review on image clustering // Image Processing, IET. 2015. V. 9 (11). pp. 1020–1032.
6. Aggarwal C.C., Reddy C.K. Data clustering: algorithms and applications. CRC Press, 2014. 626 p.

7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2017. 448 с.
8. Graves A., Schmidhuber J. Offline Handwriting Recognition with Multidimensional Recurrent Neural Networks // NIPS. 2008. pp. 545–552.
9. Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Иссл. Земли из Косм. 2014. Т. 1. С. 3–17.
10. Тимонин В.И., Курбатов Р.А., Носов В.Н. Об одном статистическом методе обнаружения аномалий на снимках морской поверхности // Процессы в геосредах. 2016. № 4. С. 363–370.
11. Тимонин В.И., Тяникова Н.Д., Носов В.Н., Иванов С.Г., Климентьев М.К. Применение многомерных корреляционных процедур для идентификации следных структур на космических снимках морской поверхности // Процессы в геосредах. 2018. № 4. С. 1221–1225.



## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ**

**К.Б. Устинов**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, [ustinov@ipmnet.ru](mailto:ustinov@ipmnet.ru)*

В связи с применением более сложных технологий бурения и добычи все большее значение приобретают физическое и математическое моделирование геомеханических процессов в нефтегазовых пластах. Моделирование позволяет оценивать поведение и изменение среды в процессе бурения и эксплуатации скважин, решать вопросы, связанные с повышением их устойчивости и продуктивности.

Среди основных задач моделирования следует отметить в первую очередь задачи связанные с фильтрацией флюидов и задачи связанные с определением напряженно-деформированного состояния. Конечными целью при этом является создание эффективных и безопасных технологий бурения и добычи. Оба круга задач тесно взаимосвязаны, поскольку в их основе лежат взаимосвязанные механические и фильтрационные процессы. Эти процессы описываются достаточно универсальными уравнениями пороупругопластичности. В общем случае полная система этих уравнений связная. Кроме определяющих уравнений в модель входят граничные условия – давления флюида и напряжения, в общем случае различные по разным направлениям. В ряде случаев существенную роль может играть температура, ее влияние проявляется в возможном изменении свойств, обратное влияние механических и фильтрационных процессов обычно малозначительно.

Применительно к горным породам задача пороупругопластичности имеет ряд особенностей, к которым, в первую очередь относятся:

- влияние не только касательных, но и нормальных напряжений на переход к неупругому деформированию;
- анизотропию упругих и прочностных свойств;
- возможное наличие объемного неупругого деформирования и его нетривиальную связь с напряженным состоянием: как минимум отсутствие пропорциональности неупругой объемной деформации действующим объемным напряжениям.
- неочевидная зависимости проницаемости от напряженно-деформированного состояния.

Для учета вклада каждой из данных особенностей в процесс деформирования было предложено множество достаточно адекватных моделей. Так, влияние нормальных напряжений на переход в неупругое состояние, характерное для горных пород, отражено в критериях Кулона-Мора и Друкера-Прагера [1, 2] (см. также [3]).

Обобщение теории пластического деформирования для учета анизотропии было получено Хиллом [4], однако без учета влияния нормальных напряжений на процесс деформирования. Данный учет был осуществлен в моделях [5, 6].

Для описания деформирования, сопровождающегося неупругим изменением объема, Рейнольдсом [7] было введено понятие дилатансии. Согласно данной концепции для девиаторной части пластических деформаций применяются, как правило, традиционные для пластичности определяющие соотношения (ассоциированный закон течения), а шаровая предполагается зависящей от интенсивности сдвиговых деформаций. Идея была развита в работах [8, 9]. Очевидно, подобное описание подразумевает отсутствие ассоциированного закона течения: ассоциативность сохраняется лишь для девиаторной части пластических деформаций. Предположение ассоциативности и для полных пластических деформаций, включая шаровую часть, привело бы к нереалистичным результатам в описании механического поведения – при сжатии пород должно было бы наблюдаться непомерно большое, сопоставимое с интенсивностью пластических деформаций, неупругое изменение объема.

Данные модели, описывая по отдельности основные характерные черты деформирования горных пород, образуют базис для решения задач геомеханики. Более того, на основе многих из данных моделей реализованы программные коды. Однако, каждая из моделей, учитывая одну или несколько особенностей поведения горных пород, не учитывает другие. Интерес создателей многих существующих моделей был сконцентрирован на отдельных аспектах, при полном игнорировании других. Особенно досадно, когда подобные перекосы определяются не попыткой выделить наиболее существенные черты объекта исследования, а следованию текущим навязываемым извне «трендам»

Из опыта следует, что проницаемость является функцией истории напряженно-деформированного состояния. Традиционно учитывается вклад гидростатической составляющей тензора напряжений. Однако исследования показывают сопоставимый, а иногда и больший вклад касательных напряжений [10].

Хорошо себя зарекомендовала экспериментально определяемая зависимость проницаемости от достигнутой интенсивности эффективных касательных напряжений либо касательных деформаций [10-12].

Адаптация и развитие моделей неупругого поведения сред применительно к задачам геомеханики с целью одновременного учета основных особенностей поведения пород является актуальной задачей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, проект № 2020-1902-01-258 и частичной поддержке РФФИ, проект № 17-41-590148.*

### **Литература / References:**

1. Coulomb C.A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs, à l'architecture // Mem. Acad. Roy. Div. Sav. 1776. V. 7. pp. 343-387.
2. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design // Quart. of Appl. Math. 1952. V. 10. № 2. pp. 157–165.
3. Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of rockmechanics. Malden, Mass.; Oxford : Blackwell. MyiLibrary. 2007. 475 p.
4. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals // Proc. Roy. Soc. London A. 1948. 193. pp. 281–297.
5. Caddell R.M., Raghava E.S., Atkins A.G. A yield criterion for anisotropic and pressure dependent solids such as oriented polymers // Journal of Materials science. 1973. Vol. 8. pp. 1641–1646.
6. Lui C., Huang Y., Stout M.G. On the asymmetric yield surface of plastically orthotropic materials: a

- phenomenological study // Acta Mater. 1997. V. 45. №6. pp. 2397–2406.
7. Reynolds O. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact, with experimental illustrations // Philosophica Magaz. 1885. Ser. 5. № 20 (127). pp. 469–481.
  8. Николаевский В. Н. О связи объемных и сдвиговых деформаций и об ударных волнах в мягких грунтах // ДАН СССР. 1967. Т. 177. С. 542–543.
  9. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 448 с.
  10. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Dependence of permeability on stress state // Ser. Advances in Oil and Gas Exploration and Production. 2020. pp. 85–96.
  11. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Results of tests of rock specimens by using tilts. Geomechanics of oil and gas wells // Ser. Advances in Oil and Gas Exploration and Production. 2020. pp. 107–140.
  12. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Моделирование деформирования и разрушения анизотропных пород вблизи горизонтальной скважины // ФТПРПИ. 2017. № 3. С. 12–21.



## КАРТИРОВАНИЕ КАРСТОВЫХ ПЕЩЕР РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

*К.В. Федин<sup>1,2,3</sup>, Ю.И. Колесников<sup>1</sup>, Л. Нгомайеэв<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, fedinkv@ipgg.sbras.ru*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

К образованию естественных пещер могут приводить различные процессы, например, тектонические, эрозионные, вулканические, карстовые и др. Наиболее многочисленны пещеры карстового происхождения, образующиеся в результате растворения горных пород, таких как известняк, доломит, мрамор, мел и некоторых других, водой или водными растворами. Карстовую природу имеют практически все наиболее известные пещеры мира, и, по некоторым оценкам, карстовые образования в той или иной степени распространены под примерно 10–20% земной поверхности [1].

В [2, 3] на результатах физического моделирования и натурного эксперимента показано, что по записям сейсмических шумов (микросейсм) можно определять частоты стоячих волн, генерируемых шумами в пространстве между земной поверхностью и кровлей подземных пустотелых объектов. Эти частоты могут быть использованы для обнаружения и картирования таких пустот. В данной статье приводятся результаты применения такой методики на реальном природном объекте – пещере карстового происхождения.

Барсуковская пещера находится в Маслянинском районе Новосибирской области (Россия), примерно в 100 км к юго-востоку от г. Новосибирска (рис. 1, а). Пещера образовалась в результате карстовых явлений в массиве карбонатных пород (преимущественно кристаллического известняка с примесями глинистых минералов, доломита, кварца, пирита, мела, гипса), выходящих на поверхность на скалистом правом берегу р. Укроп примерно в 2,5 км к юго-востоку от с. Барсуково. Спелеологи относят эту пещеру к коридорно-лабиринтовому типу. В 2000 г. она вместе с прилегающей территорией площадью 37 гектаров объявлена памятником природы областного значения, так как является крупнейшей не только в Новосибирской области, но и на всём юго-востоке Западной Сибири зимовочной колонией летучих мышей [4].

При формировании стоячих волн между нижней и верхней границами слоя с двумя свободными границами должно укладываться целое число полудлин стоячих волн. По механизму образования эти волны подобны стоячим волнам в незакрепленном тонком стержне [5]. Регистрация микросейсм проводилась на площадной системе наблюдений в пределах участка размером примерно 24×34 м<sup>2</sup> (см. рис. 1, б) в узлах квадратной сетки

с шагом 0.5 м. Из-за особенностей рельефа и большого объема наблюдений (более 2000 точек) измерения проводились не на всей площади участка. В частности, измерений не было на крутом склоне над входом в пещеру.



Рисунок 1. Географическое положение Барсуковской пещеры (а) и взаимное расположение входа в пещеру и участка съемки (б).

Для записи микросейсм применялись одноканальные цифровые регистраторы Texan (RefTek-125A) с частотой дискретизации 1 кГц, а в качестве датчиков – вертикальные геофоны GS-20DX. Всего было задействовано 27 комплектов аппаратуры. Записи от вертикальных геофонов использовались для определения частот стоячих волн сжатия-растяжения, генерируемых шумами в приповерхностных породах. Для этого при обработке записи разбивались на фрагменты по 8192 отсчета (примерно по 8.2 с), вычислялись их амплитудные спектры и проводилось их осреднение.

Появление на осредненном спектре регулярных пиков, согласующихся с (1), трактовалось как свидетельство существования под данной точкой наблюдений подземного пустотелого объекта (рис. 2).

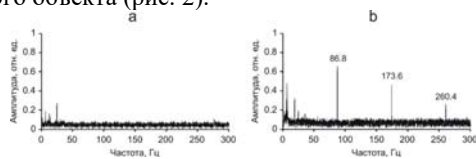


Рисунок 2. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных над ненарушенным породным массивом (а) и над пещерой (б).

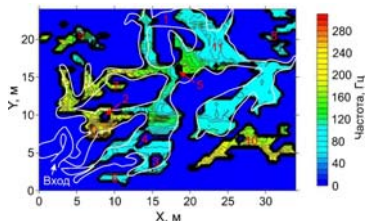


Рисунок 3. Карта распределения на участке наблюдений частоты  $f_1$  низшей моды стоячих волн сжатия-растяжения; белой линией показаны контуры пещеры, соответствующие схеме пещеры, составленной спелеологом С. Пешиковым.

Поскольку только низшая мода стоячих волн вертикального сжатия-растяжения прослеживается над сводами пещеры на всей площади наблюдений, то для картирования использовалась именно эта мода. На рис. 3 показана карта распределения на участке наблюдений частоты  $f_1$  низшей моды стоячих волн сжатия-растяжения (далее для простоты будем называть ее картой частот). Для точек, в которых резонансные пики не выделялись (например, как на рис. 2, а), частота  $f_1$  принималась равной нулю, что формально соответствует слою бесконечной мощности. Нулю эта

частота также приравнивалась в тех точках исследуемого участка, где измерения не проводились.

Проведенные на участке Барсуковской пещеры площадные пассивные сейсмические наблюдения показали, что под воздействием сейсмического шума (микросейсм) в пространстве между земной поверхностью и кровлей пещеры образуются стоячие волны сжатия-растяжения. Накопление амплитудных спектров большого числа шумовых записей позволило определить частоты от одной до четырех первых мод этих волн над ходами и гротами пещеры. В других местах стоячие волны не наблюдались.

Построена карта распределения частоты низшей моды на участке наблюдений, которая позволила оконтурить пещеру в плане. Результаты оконтуривания в целом совпадают с данными спелеологов. По частотам низшей моды построена карта глубин сводов пещеры от земной поверхности, которая на качественном уровне также согласуется с данными спелеологов.

В целом, согласно приведенным результатам, пассивный сейсмический метод стоячих волн показал себя эффективным инструментом для картирования подземных пустот. Одно из основных ограничений метода – невозможность определения нижних границ подземных полостей, так как выделяемые из микросейсмического поля стоячие волны образуются в пространстве между сводами пещеры и земной поверхностью. Соответственно, отсутствует возможность оценить вертикальные размеры ходов и гротов пещеры и ее объем.

*Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0009 «Динамический анализ сейсмических данных для построения реалистичных моделей геологической среды на основе математического и физического моделирования».*

#### **Литература / References:**

1. Palmer A.N. Origin and morphology of limestone caves // Geol. Soc. Am. Bull. 1991. V. 103 (1). pp. 1–21. DOI 10.1130/0016-7606(1991)103<0001:OAMOLC>2.3CO;2
2. Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсмам: физическое моделирование // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 89–96.
3. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // Geophys. Prospec. 2018. V. 66 (2). pp. 342–353.
4. Особо охраняемые природные территории Новосибирской области. Памятники природы: Улантова гора, каменистая степь у села Новососедово, Барсуковская пещера, Бердские скалы, 2006. Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Новосибирской области, Новосибирск.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971.



---

## **ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПЛЕНИЯ ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ ПЛОТИНЫ ГЭС ПО СТОЯЧИМ ВОЛНАМ**

**К.В. Федин<sup>1,2,3</sup>, Ю.И. Колесников<sup>1</sup>, Л. Нгомайезе<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, fedinkv@ipgg.sbras.ru*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

Строительство гидроэлектростанций (ГЭС) во многих случаях сопровождается возведением грунтовых плотин и дамб, которые в процессе эксплуатации могут

подвергаться воздействию различных процессов (давлению волн и льда, внутренней эрозии из-за фильтрационных процессов, сезонных промерзаний и оттаиваний и т.д.), приводящих к изменению их проектных характеристик. Как показывает статистика, на долю грунтовых плотин приходится более половины всех аварий, происходящих на плотинах гидротехнических сооружений [1].

Для защиты подвергающихся динамическому воздействию волн и льда верховых откосов грунтовых плотин и дамб применяются различные виды креплений. В частности, на Новосибирской ГЭС верховые откосы укреплены бетонными плитами. Появление дефектов в верховых откосах происходит вследствие изменения состояния грунтов и потери прочности бетона железобетонных плит. Своевременное выявление этих дефектов позволяет вовремя принимать соответствующие меры по их устранению.

Для Новосибирской ГЭС важной практической задачей является обнаружение пустот под бетонными плитами крепления верховых откосов (рис. 1). Помимо этого, желательно также контролировать толщину бетонных плит в точках измерения. Наиболее распространенный метод решения задач такого рода, применяемый, например, для обследования дорожных покрытий, основан на электромагнитном зондировании дорожных покрытий и их оснований георадаром [2, 3]. Этот метод характеризуется высокой производительностью и достаточно хорошей точностью, но при большой изменчивости электрических параметров исследуемой среды он может требовать периодической калибровки аппаратуры. Кроме того, бетонные плиты, как правило, армированы стальными сетками, что также ограничивает возможности георадара.



*Рисунок 1. Плиты крепления верхового откоса плотины Новосибирской ГЭС.*

Ниже представлены примеры применения акустического метода, для обнаружения пустот под бетонными плитами и контроля их толщины, на базе выделения стоячих волн из записанного на поверхности бетонной плиты акустического шума [4–6].

Для оценки возможностей применения акустического метода стоячих волн для обследования креплений верховых откосов плотины Новосибирской ГЭС были проведены натурные эксперименты на четырех предположительно "проблемных" плитах. Размер плит в плане –  $10 \times 10$  м<sup>2</sup>. Регистрация шумовых записей проводилась на всей поверхности плит по квадратной сетке с шагом 1 м. Для регистрации использовался двухканальный цифровой осциллограф В-423 с частотой дискретизации 100 кГц.

В качестве приемников использовались широкополосные пьезокерамические датчики поршневого типа с вертикально направленной осью максимальной чувствительности, которые при измерениях устанавливались непосредственно на очищенную поверхность плит. Сигналы от датчиков регистрировались цифровым осциллографом и записывались на жесткий диск компьютера (ноутбука) для последующей обработки. Для ускорения измерений рядом с точками наблюдений на бетонные плиты производилось дополнительное шумовое воздействие с помощью щетки с жесткой щетиной. Это позволило сократить время регистрации в каждой точке



с 5–10 минут, необходимых при работе с естественными акустическими шумами, до примерно 30 секунд.

При обработке записи разбивались на фрагменты длительностью по 8192 отсчетов (примерно 82 мс), после чего проводилось накопление амплитудных спектров этих фрагментов. На рис. 2 приведены примеры осредненных спектров шумовых записей, зарегистрированных в двух точках наблюдений. Как можно видеть, даже при относительно малой длительности регистрации шумов на их спектрах можно уверенно выделить как минимум два регулярных резонансных пика.

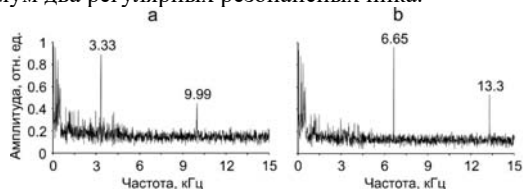


Рисунок 2. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных на плитах верхового откоса плотины над жестким основанием (а) и над полостью (б).

На рис. 3 показано распределение частоты низшей моды по поверхности исследуемых плит. Как видно из рисунка, на некоторых участках плит, примыкающих к их торцам, наблюдается примерно двукратное повышение частоты низшей моды. Это свидетельствует о том, что в этих местах нарушен контакт плиты с основанием (образовалась промоина) или произошло существенное снижение жесткости грунтов основания.

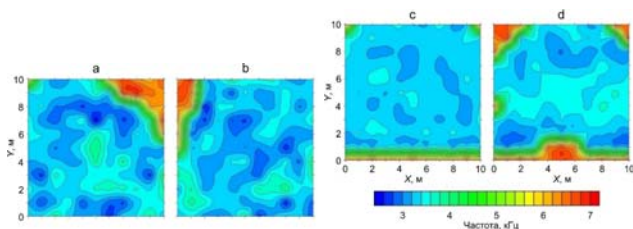


Рисунок 3. Распределение частоты низшей моды стоячих волн по поверхностям бетонных плит верхнего (а–б) и нижнего (с–д) рядов.

Таким образом, приведенные результаты показали, что метод стоячих волн позволяет надежно диагностировать изменения в грунтах основания бетонных плит крепления откосов дамб и плотин, в частности, выявлять образовавшиеся пустоты и участки разуплотненных грунтов.

*Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0009 «Динамический анализ сейсмических данных для построения реалистичных моделей геологической среды на основе математического и физического моделирования». Полученные результаты показали, что записи акустических шумов можно с успехом использовать для диагностирования потери устойчивости участков надземных трубопроводов, вызванной снижением жесткости закрепления пролетов трубы.*

#### Литература / References:

1. Юзбеков Н.С. Проблемы оценки состояния грунтовых плотин // Технологии гражданской безопасности. 2004. №2(6). С. 62–65.
2. Derobert X., Fauchard C., Côte P., Le Brusq E., Guillanton E., Dauvignac J.Y., Pichot C. Step-frequency



radar applied on thin road layers // J. Appl. Geophys. 2001. V. 47. No. 3–4. pp. 317–325.

3. Khamzin A.K., Varnavina A.V., Torgashov E.V., Anderson N.L., Sneed L.H. Utilization of air-launched ground penetrating radar (GPR) for pavement condition assessment // Constr. Build. Mater. 2017. V. 141. pp. 130–139.
4. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Obnaruzheniye podzemnykh pustot po mikroseysmam: fizicheskoye modelirovaniye // Tekhnologii seysmorazvedki. 2015. № 4. pp. 89–96.
5. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., Ngomayyezve L. Diagnostika osnovaniya tverdogo dorozhnogo pokrytiya po uprugim stoyachim volnam // Inzhenernyye izyskaniya. 2018. V. XII (7–8). pp. 84–91.
6. Kolesnikov Yu. I, Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // Geophys. Prospect. 2018. V. 66. pp. 342–353.



## ГИДРОДИНАМИКА КАПЛИ ВОДЫ ПРИ ЕЁ СТОЛКНОВЕНИИ С НЕБОЛЬШИМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

*А.И. Федюшкин, А.Н. Рожков*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, fai@ipmnet.ru, rozhkov@ipmnet.ru*

Исследование растекания капель при падении на твердую поверхность имеет фундаментальное и прикладное научное значение для изучения закономерностей многофазной гидродинамики различных физических процессах, в частности, например, при исследовании распространения и защиты от вирусов, передаваемых воздушно-капельным путём с наличием инфицированных капель. Изучению динамики капель посвящено большое количество работ, обзоры работ, по исследованию гидродинамики при ударе и растекании капель, можно найти в работах [1–4]. В данной работе представлены экспериментальные данные и результаты численного моделирования гидродинамики капли воды при падении на небольшую твердую поверхность. Численное моделирование осуществлялось на основе решения 2D и 3D уравнений Навье–Стокса для двухфазных систем «воздух-вода», модель и численный метод описаны в [4, 5].

Простейший вариант столкновения – удар капли по небольшому диску (рис. 1). В результате удара формируется круглая жидкая плёнка (ламелла), ограниченная краевой струей (жидким тором), которая сначала расширяется, а затем схлопывается. Для случая на рис. 1 весь процесс занимает не более 6 мс. В данной работе уделено внимание трем этапам взаимодействия капли с твёрдой поверхностью: 1- начальная стадия (формированием струи и захват микропузырька), 2 – образование и растекание ламеллы, 3 – схлопывание ламеллы. Математическое моделирование проведено для разных диаметров капель от  $d_i=0.5$  до  $d_i=4$  мм, скоростей от  $v_i=1$  м/с до  $v_i=3.87$  м/с, свойств и углов смачивания, что соответствовало диапазонам числа Вебера  $We_i=50-800$  и числа Рейнольдса  $Re_i=70-2 \cdot 10^3$ . Диаметр твердого препятствия (диска) был равен  $d_i=2$  мм – для капель с диаметром  $d_i<2$  мм и  $d_i=4$  мм – для капель с диаметром  $d_i>2$  мм.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные растекания капли воды ( $v_i=3.87$  м/с,  $d_i=2.67$  мм,  $d_i=4$  мм), показывающие формирование ламеллы, краевой струи и отрыв вторичных капель. На рис.1 также изображены результаты 3D моделирования динамики капли воды ( $v_i=3.87$  м/с,  $d_i=1$  мм), падающей на твердую гидрофобную поверхность и растекаясь по ней без трения. На рис. 1 показан профиль капли сбоку в плоскости  $y=0$  в момент времени  $t=5 \cdot 10^{-4}$  с, а также справа изображены изолинии модуля скорости, из которых виден контур растекающейся капли с краевой струей в момент  $t=7 \cdot 10^{-4}$  с. Следует отметить, что безразмерные времена  $\tau=t/(d_i/v_i)$  на рис.1 для

эксперимента и расчёта близки и приблизительно равны 2.

На рис. 2 показана динамика падающей капли воды в начальные моменты взаимодействия с твердой поверхностью, а на рис. 3 в заключительные моменты схлопывания капли. При падении капли с большой скоростью и столкновении ее с твердой поверхностью, во-первых, возможен захват воздуха (в виде пузырька или мини тора) между каплей и поверхностью (рис. 2 слева внизу). Во-вторых, при соприкосновении с поверхностью образуется очень тонкая и, как следствие, очень быстрая начальная струя (рис. 2), а затем формируется ламелла (рис. 2) с краевой струей, схема которой показана на рис.1 слева.

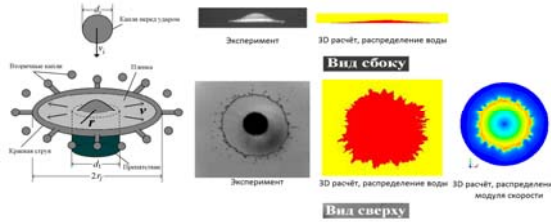


Рисунок 1. Схема соударения капли жидкости с небольшим твёрдым диском. Справа результаты 3D расчёта: красным цветом показана фракция воды в момент времени  $t=1.4$  мс в горизонтальной плоскости диска и в центральной вертикальной плоскости; изолинии модуля скорости в момент  $t=0.7$  мс ( $d_i=1$  мм), Фотографии и расчёт соответствуют условиям удара:  $d_i=2.67$  мм,  $v_i=3.87$  м/с,  $We_i=\rho v_i^2 d_i/\gamma=550$ , плотность  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>, поверхностное натяжение  $\gamma=0.072$  Н/м,  $d_d=4.0$  мм.

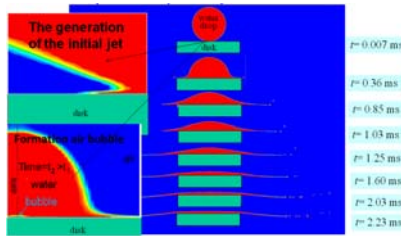


Рисунок 2. Растекание капли с отрывом микрокапель.

При растекании капли при больших числах Рейнольдса и Вебера в течение времени силы вязкости и поверхностного натяжения уравновешивают силы инерции (диаметр краевой струи ламеллы достигает максимального значения  $d_m$ ), и ламелла начинает сжиматься под действием сил поверхностного натяжения.

На рис. 3 показано расположение пленки воды для разных моментов времени (сжатие ламеллы), от упавшей капли в момент  $t=0$  ( $d_i=3.89$  мм,  $v_i=3.84$  м/с,  $We_i=792$ ) на твердую «мишень» диаметром  $d_i = 4$  мм.

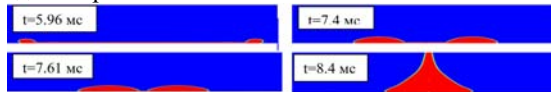


Рисунок 3. Схлопывание ламеллы.

Временные зависимости изменения максимального растекания ( $R_m=d_m/2$ ) капли диаметром  $d_i=1$  мм, падающей на твердую поверхность со скоростью  $v_i=3.87$  м/с в начало координат изображены на рис. 4. Линии 1 и 2 – показывают изменение во времени максимальных расстояний растекания в плоскости  $x=0$  в обе стороны от начала

координат в направлении  $y$ , линии 3 и 4 – зависимости  $R_m$  от времени в плоскости  $y=0$  в обе стороны от начала координат в направлении  $x$ . Линия 5 – показывает изменение максимальной толщины растекающейся капли (пленки) по оси  $z$ . Данные зависимости показывают характер растекания капли, время и степень несимметричности максимального радиуса растекания капли. В [2, 4] было показано, что данные зависимости в безразмерных переменных носят универсальный характер и структура течения в маловязкой капле при столкновении с препятствием не зависит от параметров удара и свойств жидкости.

Результаты экспериментов и математического моделирования показали, что начальная стадия взаимодействия падающей капли с твердой поверхностью краткосрочна и нетривиальна. Показаны особенности гидродинамики капли на разных этапах ее растекания. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными показало хорошее их согласие.

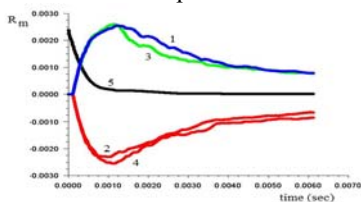


Рисунок 4. Зависимости изменения максимального расстояния растекания капли ( $R_m$ ) от времени по разным координатным плоскостям: линии 1, 2 в плоскости  $x=0$ ; линии 3, 4 -  $y=0$ ; линия 5 – максимальная толщина, растекающейся капли (ламеллы) по оси  $z$ ).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-04-60128

#### Литература / References:

1. Yarin A.L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing // Ann. Rev. Fluid Mech. 2006. V. 38. pp. 159–192.
2. Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Удар и растекание капель // Препр. ИПМех РАН. 2014. № 1086. М., 30 с.
3. Rozhkov A., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Star-like breakup of polymeric drops in electrical field // J. Non-Newton. Fluid Mech. 2015. V. 226. pp. 46–59.
4. Рожков А.Н., Федюшкин А.И. Моделирование столкновения капли воды с небольшим препятствием // В сб. 10 Межд. конф. «Волны и вихри в сложных средах». 2019. С. 272–275.



## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ, ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ АНТРОПОГЕННОГО МОРСКОГО МУСОРА НА ПОБЕРЕЖЬЕ САМБИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ)

С.В. Фетисов<sup>1</sup>, И.П. Чубаренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Балтийский федеральный университет имени И.Канта, Калининград,  
mr.fetiss@gmail.com

<sup>2</sup> Институт океанологии имени П.П. Ширинова РАН, Москва, irina\_chubarenko@mail.ru

Представлены исследования процесса загрязнения берега моря антропогенным мусором, в частности микропластиком и макропластиком. Описание движения частиц и объектов пластикового мусора в океане до настоящего времени представляет

значительные трудности [2], поскольку они имеют очень различные размеры, плотность, форму, и все эти свойства изменяются со временем пребывания в окружающей среде. Однако, использование разнообразных возможностей численного моделирования, помогает в анализе физических основ/условий, при которых реализуются (в некоторых местах и в какие-то моменты времени) события выброса на берег больших объёмов морского мусора. Уже есть примеры моделей, описывающие движения частиц пластика, но пока только на глобальном масштабе Мирового океана в целом [1].

Разрабатывается система прогнозирования ситуаций значительных выбросов мусора антропогенного происхождения на пляжи Самбийского полуострова в результате действия ветра, волн, течений и других (природных и антропогенных) внешних факторов. Ставится задача на основании метеорологической и гидрофизической информации определить, когда и при каких условиях будет наблюдаться очередной выброс морского мусора на побережье. При этом обычные гидродинамические, лагранжевы или статистические модели для решения данной задачи оказались неэффективны – они позволяют отвечать только на узкие и частные вопросы. В настоящее время в ряде работ [3,4] предлагается альтернативный подход, опирающийся на использование машинного обучения и искусственной нейронной сети (ИНС) для решения задач прогнозирования в океанологии.

Проведен детальный анализ более двух десятков штормов, предшествующих событиям выброса мусора на берег Самбийского полуострова. Собраны гидрометеорологические и гидрофизические данные до и во время события выброса, такие как скорость и направление ветра (с нефтяной платформы Дб), значительная высота волны (из реанализа ERA5). Исходя из анализа этих данных и сопоставления их с натурными наблюдениями, было выявлено: (i) значительному выбросу мусора предшествует шторм со скоростью ветра не менее 15 м/с (за 5-6 суток до выброса); (ii) в период 72 часа до выброса, во время стихания шторма, вновь наблюдалось повышение волнения и скорости ветра; (iii) выброс наблюдался при значительной высоте волны в открытом море ~0.2 м и скорости ветра 5-6 м/с.

Полученный результат основан лишь на натуральных наблюдениях, но уже выявлены факторы, непосредственно влияющие на выброс антропогенного мусора, которые можно использовать для создания прогностической модели ИНС. Кроме того, предлагается дополнительно использовать данные, которые напрямую не влияют на конкретный выброс морского мусора, но могут влиять на содержание в нём мусора антропогенного происхождения: это расстояние от места выброса до ближайшего населенного пункта, население в окрестности 5 км, туристическая активность [3]. Это позволит повысить точность прогностической модели ИНС.

*Разработка модели ИНС проводится в рамках программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта на 2016 -2020 годы (проект 5-100) государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100». Натурные данные собраны при поддержке международного проекта РФФИ №18 55-76001 0028 (ERA.net).*

### **Литература / References:**

1. Isobe A., Iwasaki Sh., Uchida K., Tokai T. Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066 // Nature Communic. 2019. V. 10. 417. DOI 10.1038/s41467-019-08316-9
2. Van Sebille E., Aliani S., Law K.L. et al. The physical oceanography of the transport of floating marine debris // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. 023003. DOI 10.1088/1748-9326/ab6d7d
3. Franceschinia S. Rummaging through the bin: Modelling marine litter distribution using Artificial Neural Net-

- works // Marine Pollut. Bull. 2019. V. 149. 110580. DOI 10.1016/j.marpolbul.2019.110580
4. Schulz M., Matthies M. Artificial neural networks for modeling time series of beach litter in the southern North Sea // Marine Envir. Res. 2014. V. 28 (98). pp. 14–20. DOI 10.1016/j.marenvres.2014.03.014



## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ПЛАСТА НА СКВАЖИНАХ, ПРОБУРЕННЫХ НА АЧИМОВСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ**

***В.В. Химуля***

*Институт проблем механики им. А.Ю. Иллинского РАН, Москва,  
valery.khim@gmail.com*

Определение и анализ механических свойств горных пород, особенно реологических характеристик, необходимы как для выбора правильного режима эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, так и в целях определения условий устойчивости стенок скважин. Помимо этого, одним из важнейших вопросов нефтегазовой отрасли остается проблема повышения дебита добывающих скважин. Главное влияние на величину притока углеводородов оказывает состояние призабойной зоны скважины. Ухудшение проницаемости даже в малой окрестности скважины может существенно снизить ее продуктивность [1]. При бурении и эксплуатации скважин происходит существенное изменение напряженно-деформированного состояния горных пород, что оказывает значительное влияние на их фильтрационные и реологические характеристики. Физическое моделирование реальных напряжений в окрестности скважины позволяет определить возможность и способы повышения продуктивности скважины и уменьшения риска разрушения стенок скважин [2]. Особенно актуальным сегодня становится поиск эффективных способов повышения нефтеотдачи для месторождений с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов.

Большие запасы нефти, относящиеся к трудноизвлекаемым запасам, сосредоточены в ачимовских отложениях. Проницаемость пород ачимовских отложений составляет несколько миллиардов, для их эффективной разработки требуются специальные технологии.

В ИПМех РАН был разработан новый эффективный, экономичный, экологически чистый способ повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин — метод направленной разгрузки пласта. При применении этого метода в результате создания в призабойной зоне пласта напряженного состояния определенного уровня и типа путем уменьшения давления в скважине и формирования определенной геометрии забоя может происходить растрескивание, дезинтеграция породы, сопровождающиеся необратимым увеличением ее проницаемости. Необходимые для условий конкретного месторождения напряжения определяются путем испытаний образцов породы продуктивного пласта на Испытательной системе трехосного независимого нагружения ИСТНН. Эта уникальная установка, созданная в ИПМех РАН, позволяет моделировать в лабораторных условиях на образцах горных пород реальные напряженные состояния, возникающие в пласте при проведении различных технологических операций на скважине. Система позволяет в ходе нагружения осуществлять непрерывное измерение проницаемости и таким образом определять зависимость фильтрационных свойств породы от напряженно-деформированного состояния [3].

На установке были проведены опыты по моделированию процессов деформирования и разрушения пород ачимовских отложений Уренгойского

газоконденсатного месторождения в реальных условиях, возникающих при использовании метода направленной разгрузки пласта на скважинах на глубинах около 4-х км. Моделировались условия для двух видов конструкции забоя скважины: открытый ствол скважины (рис. 1) и перфорационное отверстие в обсаженной скважине (рис.2).

В обоих случаях при достижении напряжениями определенного уровня наблюдалось интенсивное неупругое деформирование - образцы начинали ползти, что приводило к их растрескиванию и скачкообразному увеличению проницаемости.

Результаты моделирования указывают на эффективность применения метода направленной разгрузки пласта на скважинах, пробуренных на ачимовские отложения. В ходе опытов были определены механические свойства пород месторождения. Полученные результаты могут быть использованы для создания геомеханической модели месторождения и выработки практических рекомендаций по увеличению дебита скважин и недопущению негативных процессов в пласте.

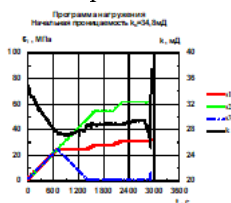


Рисунок 1. Моделирование открытого ствола скважины.

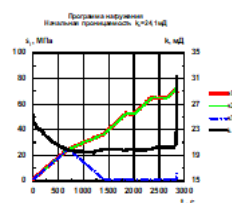


Рисунок 2. Моделирование перфорационного отверстия.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № АААА-А17-117021310371-9 и при частичной поддержке РФФИ, проект № 17-41-590148.

#### Литература / References:

1. Кук Дж., Фредериксен Р.А., Хасбо К. и др. О важности механических свойств горных пород: лабораторная проверка геомеханических данных // Нефтегазовое обозрение. 2007. С. 44–69.
2. Карев В.И., Химуля В.В. Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные характеристики пород-коллекторов нефтегазовых месторождений // Уч. зап. Физич. факультета Моск. Унив. 2018. Т. 4. С. 1840405.
3. Karev V., Kovalenko Yu. Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production // True triaxial testing of rocks. Leiden: CRC Press/Balkema, 2013. pp. 301–310.



## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ФАКТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАНАЛИЗА GLORYS12v.1.

А.В. Холодцев <sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Севастопольское отделение ГОИН имени Н.Н. Зубова, Севастополь, [sogoin@mail.ru](mailto:sogoin@mail.ru)

<sup>2</sup> Севастопольский государственный университет, Севастополь, [sevgu@gmail.com](mailto:sevgu@gmail.com)

Многолетние изменения уровня водной поверхности различных районов Мирового являются существенными факторами переформирования их берегов, а также изменений экологических условий на прибрежных территориях и глубин на фарватерах. Поэтому оценка возможностей их изучения с применением различных информационных ресурсов является актуальной проблемой физической географии, океанографии, экологической безопасности, а также судовождения.

Наибольший интерес ее решение представляет для регионов Мирового океана, побережья которых густо населены и обладают значительным рекреационным потенциалом, а в их социально-экономическом развитии существенную роль играют морские транспортные комплексы. Одним из них является Черное море, омывающее побережья России, Украины, Румынии, Болгарии, Турции и Грузии.

Основой существующих представлений о закономерностях изменения уровня Черного моря являются работы Ф.Ф. Врангеля, Э.В. Майделя, Э.А. Брюкнера, Н.М. Книповича, В.П. Зенковича, Д.Я. Беренбейма, Р.К. Клиге, Г. Мьнгова. Их развитию посвящены работы современных отечественных и зарубежных ученых. Установлено, что к числу важнейших факторов изменений среднего уровня Черного моря относятся процессы, влияющие на динамику его водного баланса. Важнейшее место среди них занимают перемены характеристик климата в его бассейне. Значимое влияние оказывают также неотектонические процессы, вызывающие изменения объема Черноморской впадины.

Наблюдения за изменениями уровня водной поверхности Черного моря впервые начали осуществляться в 1858 г. на постах Констанца и Сулина (Румыния). С 1974 г. они ведутся также в Очакове, с 1875 г. – в Одессе и Севастополе (Российская империя), с 1881 г. в Варне (Болгария). Всего на участках побережья Черного моря, относящихся к СССР, в различные годы функционировало 44 уровенных поста. До начала последней четверти XX века на большинстве уровенных постов измерения проводились по фудштокку. Значения уровня отсчитывались в согласованные сроки (от двух до 4 –х раз в сутки). В современном периоде подобные наблюдения осуществляются с использованием мареографов, что позволило существенно снизить их абсолютную погрешность (составляет около 1 см). В отличие от России, Украины, Болгарии и Грузии, где принята Балтийская система, в Турции применяется система измерения уровня Türkiye ulusal düzey kontrol ağı (TUDKA-99), где за нуль принят средний уровень Средиземного моря за период с 1936 по 1971, измеренный в районе п. Анталия. В Румынии для измерения высот используются Черноморская (с 1930 г.) и Европейская вертикальная референтная система (EVRS) (с 2007 г.).

Несмотря на то, что наблюдения за изменениями уровня Черного моря у некоторых участков его побережий осуществляются уже более сотни лет, мониторинг изменений топографии всей его водной поверхности проводится лишь с 1993 г. Эти исследования выполняются с применением метода радиолокационной альтиметрии [1]. Данный метод позволяет определять средний уровень участка земной поверхности, попадающего в момент зондирования, в пределы характеристики направленности антенны радиолокатора. Так как радиус этого участка, как правило, составляет единицы км, абсолютная погрешность таких измерений составляет 5–6 см.

В прибрежных районах моря зондируемый участок частично включает также сушу, возвышающуюся над уровнем водной поверхности, вследствие чего погрешности измерений возрастают. Упомянутый метод позволяет производить измерения уровня на всех участках акватории Черного моря, через которые проходят треки соответствующих спутников. Поскольку подобных спутников немного, временной интервал между такими измерениями составляет единицы суток и зависит от расположения изучаемого участка.

Для получения информации об уровнях других участков акватории моря и в иные моменты времени применяется метод математического моделирования. С помощью глобальных гидродинамических моделей динамики уровня водной поверхности всего Мирового океана, которые верифицированы с использованием результатов мониторинга этого процесса, осуществляется его ретроспективный анализ (далее реанализ).



Одним из наиболее совершенных и точных реанализов изменений уровня Мирового океана принято считать GLORYS12.v1 (Global Ocean Physics Reanalysis), который поддерживается сервисом Copernicus. Представленные в нем сведения получены с использованием океанической модели NEMO [2]. При ее верификации используются результаты глобального спутникового мониторинга. Информация об уровне того или иного участка акватории Мирового океана характеризуется разрешением по времени 1 сутки, а по координатам -5 угловых минут. Для уменьшения дисперсии ошибок моделирования применен фильтр Калмана, тем не менее, реальная точность результатов данного реанализа зависит от расположения изучаемого океанического района. Погрешности моделирования многолетних изменений среднемесячных и среднегодовых значений уровня водной поверхности различных районов Черного моря ранее не оценивались.

Цель данной работы – определение систематических и абсолютных погрешностей оценок среднемесячных и среднегодовых значений уровня водной поверхности различных районов Черного моря, которые получены с использованием результатов реанализа GLORYS12.v1.

Установлено, что достоверность статистического вывода о том, что изменения среднегодовых и среднемесячных значений уровня Черного моря, оцененные по результатам реанализа GLORYS12.v1, адекватно описывают фактические изменения этих показателей на любых уровнях постах России составляет не менее 0.95.

Определены систематические и абсолютные погрешности оценок среднегодовых и среднемесячных значений уровня Черного моря на каждом посту, которые получены по данным реанализа GLORYS12.v1.

Показано, что отличия оценок средние скорости многолетних изменений уровня Черного моря в изучаемых пунктах его побережий, полученных по данным реанализа GLORYS12.v1, от фактических значений этих показателей статистически значимыми не являются.

По данным реанализа GLORYS12.v1 оценены современные тенденции изменения средних скоростей многолетних вариаций среднегодовых и среднемесячных уровня всех участков акватории Черного моря. Полученные оценки свидетельствуют о в период 2008-2018 гг., на всем российском побережье Черного моря повышение среднемесячных значений его уровня в летние и осенние месяцы не выявлено, что по-видимому, связано с уменьшением средней интенсивности атмосферных осадков на территории его бассейна.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 20-45-920007.*

#### **Литература / References:**

1. Гансвинд И.Н. Современные космические технологии изучения Земли, как системы // Электронные библиотеки. 2017. Т. 20. №1. <http://ojs.kpfu.ru/index.php/elbib/article/viewFile/189/67>
2. Vichi M., Lovato T., Gutierrez Mlot E., McKiver W. Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model (Nucleus for the European Modelling of the Ocean). Bologna: BFM Consortium, 2015.





## ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ЧЕРНОГО МОРЯ И ОБЪЕМА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЕВРОПЕЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ В XXI ВЕКЕ

*А.В. Холопцев<sup>1,2</sup>, С.А. Подпорин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Севастопольское отделение ГОИН имени Н.Н. Зубова, Севастополь*

<sup>2</sup> *Севастопольский государственный университет, Севастополь, kholoptsev@mail.ru*

Многолетние изменения уровня водной поверхности любого региона Мирового океана значимо влияют на жизнедеятельность населения и особенности развития ландшафтов его побережий. Поэтому совершенствование методик их математического моделирования, является актуальной проблемой физической географии, океанографии, а также климатологии. Наибольший интерес решение данной проблемы представляет для регионов Мирового океана, побережья которых обладают высоким рекреационным потенциалом и играют важную роль в развитии социально-хозяйственных комплексов владеющих ими стран. К ним относится и Черное море.

Одним из перспективных направлений совершенствования методик моделирования динамики уровня Черного моря является поиск значимых факторов данного процесса, которые ранее не учитывались в ее моделях [2, 8].

Установлено, что к числу важнейших причин изменений уровня данного моря относятся процессы, влияющие на динамику его водного баланса. Среди таких процессов ведущую роль играют перемены характеристик климата в его бассейне, поскольку интенсивность его водообмена с другими регионами Мирового океана относительно невелика [3]. Поэтому поиск значимых факторов динамики уровня Черного моря, которые не учитывались ранее в ее моделях, целесообразно осуществлять среди процессов, способных вызывать подобные перемены.

В 1934 г. Л.С. Берг установил, что вариации уровня водной поверхности Каспийского моря значимо связаны с колебаниями характеристик климата Арктики [1]. Тогда же было выдвинута гипотеза о том, что причиной данного эффекта является связь между изменениями климата Арктики и климата бассейна данного водоема.

Согласно современным представлениям о климатических факторах динамики водных балансов и Каспийского, и Черного моря, к числу важнейших относятся вариации характеристик атмосферной циркуляции, в Европейском секторе Северного полушария [7]. Важную роль в доставке влаги в бассейны этих морей играют проходящие над ним циклоны. Существенным является также влияние вторжений арктического воздуха, которые порождают блокинги [5].

Арктический воздух, поступающий при этих процессах в бассейны обоих морей, формируется при взаимодействии с атмосферой подстилающей поверхности районов Европейского сектора Арктики [4]. Поэтому характеристики данного воздуха зависят от суммарного объема льда, который покрывает его акватории, а вариации указанного показателя могут в какой-то мере влиять на многолетний ход среднегодового уровня водной поверхности не только Каспия, но и некоторых районов Черного моря.

Не противоречит ранее установленным фактам гипотеза, согласно которой существуют участки акватории Черного моря, для которых связи изменений их среднегодового уровня, с вариациями объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики являются статистически значимыми.

Подтверждение ее адекватности позволило бы учесть рассматриваемую связь при моделировании динамики уровня соответствующих районов Черного моря, а также при планировании хозяйственной деятельности на их побережьях. Следовательно, ее проверка представляет теоретический и практический интерес.

Систематические наблюдения над изменениями уровня Черного моря впервые

начали осуществляться в 1858 г. на постах Констанца и Сулина (Румыния). С 1974 г. они ведутся также в Очакове, с 1875 г. – в Одессе и Севастополе (Российская империя), с 1881 г. в Варне (Болгария). С 1993 г. в сборе подобной информации участвуют также искусственные спутники Земли Seasat, Geosat, ERS-1, 2, TOPEX/Poseidon, Jason-1, 2, 3 и Envisat. Мониторинг динамики характеристик ледового покрова Европейского сектора Арктики осуществляют полярные станции, многие из которых принадлежат России. Полученная на них информация представлена на портале ЕСИМО. Тем не менее, проверка выдвинутой гипотезы ранее не производилась.

Цель данной работы – выявление участков акватории Черного моря, для которых статистическая связь многолетних изменений среднегодовых значений их уровня с вариациями суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики статистически значима.

Для ее достижения как фактический материал использована информация, которая получена при математическом моделировании многолетних изменений конфигурации водной поверхности Черного моря и характеристик ледяного покрова Арктики. Подобная информация содержится в результатах реанализа изменений конфигурации и характеристик ледяного покрова поверхности Мирового океана, которые получены с применением гидродинамических моделей данных процессов, которые верифицированы по фактическим результатам их мониторинга (наземного или спутникового).

Наиболее продолжительный отрезок предыстории изменений конфигурации поверхности Черного моря и характеристик ледяного покрова Арктики (с января 1979 г.) представлен в реанализе ICDC -(Integrated Climate Data Center). Данный источник содержит сведения о среднемесячных значениях уровня Мирового океана, а также сплоченности и толщины льда в узлах координатной сетки с шагом 13 км. Верификация математических моделей, применяемых для осуществления реанализа ICDC, осуществляется с использованием результатов наземных измерений, выполненных на уровневых постах и полярных станциях.

Реанализы, основанные на использовании результатов спутникового мониторинга конфигурации поверхности Черного моря, описывают динамику этого процесса за период с 1.01.1993 г.. Наиболее распространенным среди них является альтиметрический продукт DT18 (AVISO), который поддерживается сервисом Sorcmicus. Указанный источник содержит среднесуточные значения аномалии уровня Черного моря относительно среднего значения в узлах регулярной сетки. Пространственное разрешение этих данных  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ , а их временная дискретность – 1 сутки.

К такому же типу реанализов относится и GLORYS12.v1 (Global Ocean Physics Reanalysis). Представленные в нем сведения получены с использованием океанической модели NEMO, при верификации которой применена информация от всех существующих спутниковых альтиметров. Эти сведения характеризуются разрешением по времени 1 сутки, а по координатам -5 угловых минут.

Для уменьшения дисперсии ошибок моделирования применен фильтр Калмана, что делает рассматриваемый реанализ одним из наиболее точных. Результаты реанализов протестированы по данным с портала ЕСИМО.

Методика исследования предполагала:

1. Оценку по данным всех указанных реанализов среднего значения среднегодового уровня Черного моря и суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики для того или иного года.
2. Осуществление спектрального анализа временных рядов, сформированных из

значений данных показателей.

3. Сглаживание временных рядов среднегодового уровня Черного моря для каждого узла координатной сетки соответствующего реанализа, путем их осреднения в скользящем окне, длительность которого равна учетверенному периоду моды их спектра.

4. Оценку средней скорости повышения среднегодового уровня Черного моря для каждого узла координатной сетки рассматриваемого реанализа, путем вычисления (по методу наименьших квадратов) углового коэффициента линейного тренда соответствующего временного ряда, который получен в результате сглаживания.

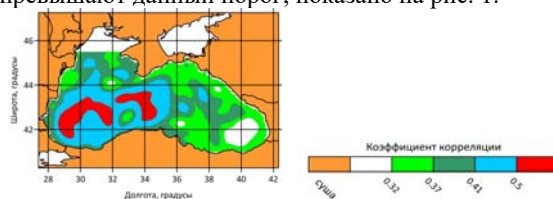
5. Проверку значимости статистической связи между каждым из временных рядов среднегодового уровня Черного моря, а также рядом суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики (с применением корреляционного анализа и критерия Стьюдента).

В результате осуществления указанных исследований установлено, что многолетний ход среднегодовых значений среднего уровня всей поверхности Черного моря представляет собой сложное колебание, в спектре которого присутствует мода с периодом 2,85 года. Аналогичная мода присутствует и в многолетних изменениях суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики. Период указанной моды практически совпадает с периодом квазидвухлетнего колебания [6].

Фазы этих мод совпадают при условии, что изменения суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики опережают на 1 год многолетние вариации среднего уровня Черного моря. Вследствие этого между указанными процессами действительно существуют значимые связи.

Значимыми являются также связи изменений того же показателя, с вариациями среднегодовых значений уровня многих районов Черного моря. Поскольку количество степеней свободы сопоставляемых временных рядов -26, 95% -уровень значимости их корреляции (по критерию Стьюдента) составляет 0,37.

Расположение районов Черного моря, где значения коэффициента корреляции многолетних изменений среднегодовых значений их уровней, а также опережающих ихх по времени на 1 год вариаций суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики, превышают данный порог, показано на рис. 1.



*Рисунок 1. Расположение районов Черного моря, где вариации среднегодовых значений объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики являются значимым фактором многолетнего хода среднего уровня их водной поверхности.*

Из рис. 1 видно, что на большей части акватории Черного моря вывод о наличии связи между изучаемыми процессами характеризуется достоверностью не ниже 95%. Наиболее сильная связь между ними имеет место в глубоководных районах как Западной, так и Восточной части моря. Значима она и на всем протяжении побережья Крыма между мысом Тарханкут и мысом Феолент. Во всех таких районах среднегодовое значение уровня Черного моря повышается, если с опережением по времени на 1 год увеличивается суммарный объем ледяного покрова Европейского

сектора Арктики. Следовательно, предложенная Л.С. Бергом концепция о наличии связи изменений уровня Каспийского моря с переменами климата Арктики может быть обобщена также на Черное море.

Распределение по акватории моря средних скоростей повышения среднегодовых значений его уровня, оцененных за 1979-2018 гг., и 1993-2018 гг. показано на рис. 2.

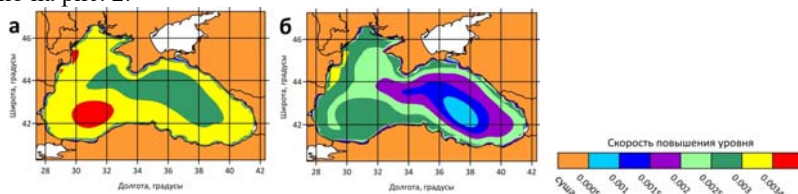


Рисунок 2. Распределения по акватории Черного моря средних скоростей повышения среднегодовых значений его уровня, оцененных за : А) 1979-2018 гг., Б) 1993-2018 гг.

Из рис. 2 видно, что в целом за период 1993-2018 гг. среднегодовой уровень Черного моря повышался значительно быстрее, чем за 1979-2018 гг. Максимальные значения средней скорости его повышения имели место в районе морского устья реки Дунай, а также в области центра циклонического круговорота Западной части моря. В период 1993-20218 гг. скорости этого процесса превышают 2,5 мм/год на всех участках побережий моря, принадлежащих России, расположенных между мысом Тарханкут и входом в Цемесскую бухту.

Среднегодовые значения суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики за 1979-2018 гг. существенно уменьшились, однако в 1993 -2018 гг. средняя скорость этого процесса снизилась, а в 2006-2018 гг. она была практически нулевой.

Таким образом, выявленные связи являются статистически значимыми при условии, что процесс-фактор (изменения суммарного объема ледового покрова Европейского сектора Арктики) опережает на 1 год процесс –отклик (изменения уровня Черного моря). Последнее свидетельствует о возможности использования выявленных связей и в задачах прогнозирования динамики уровня Черного моря с упреждением 1 год для сценария будущего, при котором характеристики этих связей не изменятся.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 20-45-920007.*

### Литература / References:

1. Берг Л.С. Уровень Каспийского моря за историческое время // Проблемы физической географии. 1934. Т. 1. С. 11–64.
2. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
3. Добровольский С.Г. Изменения климата и составляющих водного баланса. М.: Наука, 2003. С. 119–130.
4. Думанская И.О., Федоренко А.В. Анализ связи ледовых характеристик морей европейской части России с макроциркуляционными атмосферными процессами // Метеорол. Гидрол. 2008. № 12. С. 82–94.
5. Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А. Блокинг в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 5. С. 1–5.
6. Хайрулина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования. М.: ИКИ РАН, 2011. 60 с.
7. Черенкова Е.А., Семенова Е.А., Кононова Н.К., Титкова Т.В. Droughts and dynamics of synoptic

processes in the south of the East European Plain at the beginning of the twenty-first century // Аридные экосистемы. 2015. Т. 5 (2). С. 45–56.

8. Griffies S.M., Boning C., Bryan F.O. et al. Developments in ocean climate modelling // Ocean Model. 2000. No 2. pp. 123–192.



## **ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ УРОВНЯ ЧЕРНОГО МОРЯ ДЛЯ ЛЕТНЕГО СЕЗОНА, А ТАКЖЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХООБМЕНА АРКТИКИ С РЕГИОНАМИ УМЕРЕННЫХ ШИРОТ**

**А.В. Холодцев<sup>1,2</sup>, С.А. Подпорин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Севастопольское отделение ГОИН имени Н.Н. Зубова, Севастополь

<sup>2</sup> Севастопольский государственный университет, Севастополь, [kholoitsev@mail.ru](mailto:kholoitsev@mail.ru)

Необходимым условием пригодности математической модели любого изучаемого процесса для осуществления прогнозирования, является учет в ней, статистических связей, которые являются значимыми не только на отрезках времени, на которых они выявлены, но и при некоторых сдвигах моментов их начала [1]. Если продолжительность отрезка времени, в течение которого изучается некоторая связь, не велика, проверить выполнимость этого условия не просто. В таких случаях оценить наличие подобной устойчивости рассматриваемой связи можно, лишь изучив механизм, благодаря которому она существует. Поэтому выявление механизмов, которые обеспечивают связь изменений уровня Черного моря с теми или иными их факторами, является актуальной проблемой их моделирования, а также физической географии, океанографии и климатологии.

Существенный интерес решение данной проблемы представляет и для связи между изменениями уровня этого моря, а также опережающими их по времени на 1 год вариациями суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики.

Вариации указанной характеристики подстилающей поверхности Арктики действительно влияют на состояние Арктического антициклона и особенности воздухообмена данного региона, с регионами умеренных широт [2, 3]. Тем не менее, наличие причинной зависимости водного баланса Черного моря от характеристик этого воздухообмена не очевидно. Важным аргументом в пользу ее существования могло бы служить подтверждение значимости связей обоих упомянутых факторов с изменениями не только среднегодовых значений уровня Черного моря, но и его значений, осредненных за тот или иной сезон.

Одними из наиболее информативных характеристик воздухообмена между какими-либо регионами Арктики и умеренных широт, являются средние за сезон значения меридиональных составляющих скорости движения воздуха, который в приземном слое атмосферы пересекает разделяющую их границу в северном или в южном направлении. Как южная граница Арктики, отделяющая от нее территории Евразии, на которых расположена и бассейн Черного моря, а также Арктики, может рассматриваться участок Северного Полярного круга, заключенный между меридианами 15°E и 50°E. Информация о значениях указанных характеристик воздухообмена через указанную границу может быть получена как из архивных материалов, так и из соответствующих результатов реанализа [4].

Несмотря на то, что мониторинг изменений уровня Черного моря на многих участках его поверхности уже многие десятилетия осуществляют расположенные на них уровенные посты, а с 1993 г. в его осуществлении участвуют и спутники Земли, ранее подобных исследований не производилось.

Целью данной работы является проверка справедливости предположения о том, что связи многолетнего хода осредненных за некоторый сезон значений уровня каких либо участков акватории Черного моря, с вариациями аналогичных характеристик ледяного покрова Европейского сектора Арктики и его воздухообмена с бассейном этого моря, являются значимыми.

Для ее достижения как фактический материал использована информация, которая получена при математическом моделировании многолетних изменений конфигурации водной поверхности Черного моря, характеристик ледяного покрова Европейского сектора Арктики, а также ее воздухообмена с регионами умеренных широт.

Сведения об изменениях уровней различных участков водной поверхности Черного моря получены из реанализов ICDC, AVISO и и GLORYS12v.1. Данные о вариациях сплоченности и толщины льда на тех или иных участках акватории Европейского сектора Арктики получены из реанализов ICDC и GLORYS12v.1. Информация о среднесуточных значениях меридиональных составляющих скорости ветра в различных пунктах рассматриваемого участка Северного полярного круга получена из реанализа ERA-Interim.

Результаты упомянутых реанализов протестированы по данным с портала ЕСИМО. При этом оценена достоверность статистического вывода о том, что зависимости от времени ход каждого изучаемого показателя, построенные как результатам реанализа, так и по данным их фактических измерений значимо связаны между собой. Подобный вывод рассматривался как адекватный, если его достоверность, оцененная с применением корреляционного анализа и критерия Стьюдента, составляла не менее 0.95. Как пример, в таблице 1 представлены оценки адекватности информации об изменениях уровней участков водной поверхности Черного моря, где расположены некоторые уровенные посты России, которая получена из реанализов ICDC, AVISO и и GLORYS12v.1.

*Таблица 1. Результаты корреляционного анализа результатов реанализа изменений ВВП Черного моря и соответствующих данных с портала ЕСИМО. Количество степеней свободы каждого ряда 26; 95% порог значимости 0.37.*

Координаты постов	Севастоп.	Ялта	Феодосия	Новорос.	Геленджик	Туапсе
Широта	44.617	44.483	45.033	44.733	44.550	44.083
Долгота	33.533	34.167	35.383	37.783	38.033	39.050
Реанализ						
ICDC	0.694	0.782	0.307	0.716	0.615	0.762
GLORYS12v.1	0.930	0.937	0.719	0.927	0.846	0.896
AVISO	0.860	0.893	0.586	0.905	0.801	0.878

Из табл. 1 следует, что все три реанализа вполне адекватны, однако наиболее точным из них является GLORYS12v.1. Методика исследования предполагала оценку по данным указанных реанализов, для того или иного года (с 1979 по 2018), среднего за летний, осенний, зимний и весенний сезон уровня различных районов Черного моря, суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики, а также скоростей движения воздуха через его южную границу в северном и южном направлении. Для оценки параметров сглаживающего фильтра осуществлен спектральный анализ временных рядов, сформированных из значений среднего уровня Черного моря за тот или иной сезон, соответствующих всем узлам координатной сетки каждого реанализа.

С использованием сглаженных рядов среднего за каждый сезон уровня Черного моря оценена средняя скорость его повышения для всех узлов координатной сетки рассматриваемого реанализа, путем вычисления (по методу наименьших квадратов) углового коэффициента линейного тренда соответствующего временного ряда, который получен в результате сглаживания. Также, с применением метода корреляционного анализа и критерия Стьюдента оценена значимость статистической связи между каждым из временных рядов среднего за некоторый сезон уровня Черного моря, а также соответствующими рядами суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики и средних скоростей движения воздуха через его южную границу в северном и южном направлении.

В результате ее осуществления для каждого сезона, по данным реанализов ICDC, AVISO и GLORYS12v.1. выявлены распределения по акватории Черного моря средних скоростей повышения уровней различных ее участков. В качестве примера эти распределения для летнего сезона представлены на рис. 1.

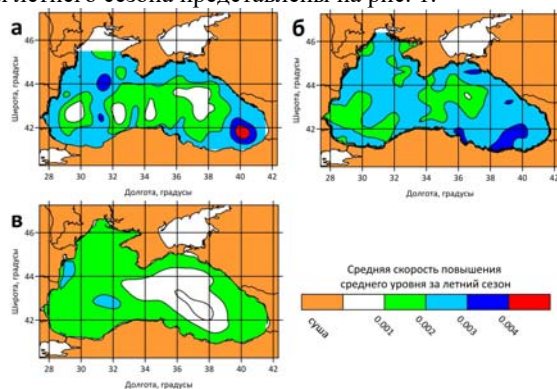


Рисунок 1. Распределения по акватории Черного моря средних скоростей за 1993-2018 гг. повышения средних уровней для летних сезонов его участков, которые оценены по данным реанализов: а) GLORYS12v.1, б) AVISO, в) ICDC.

Из рис. 1 следует, что между оценками, полученными с помощью всех трех реанализов, имеется качественное соответствие. Средние скорости изменения за 1993–2018 гг. средних уровней моря для летних сезонов повышены для всех прибрежных участков его поверхности. Максимум этого показателя соответствует центру антициклонического круговорота в юго-западной части моря. Его минимумы соответствуют центрам циклонических круговоротов Западной и Восточной части моря. Аналогичные закономерности характерны и для прочих сезонов года.

Выявлены также расположения районов Черного моря, где значения коэффициента корреляции многолетних изменений средних за тот или иной сезон значений их уровней, а также опережающих их по времени на 1 год вариаций суммарного объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики, превышают +0.37 (95% порог значимости корреляции). Как пример, их расположение для летнего сезона показано на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что на большей части акватории моря вывод о наличии связи между изучаемыми процессами характеризуется достоверностью не ниже 95%. Наиболее сильная связь между ними имеет место в глубоководных районах моря. Значима она и во всех его прибрежных районах (кроме российской части Черноморского побережья Кавказа). Во всех таких районах среднегодовое значение



уровня Черного моря повышается, если с опережением по времени на 1 год увеличивается суммарный объем ледяного покрова Европейского сектора Арктики. Для других сезонов аналогичных связей не выявлено.

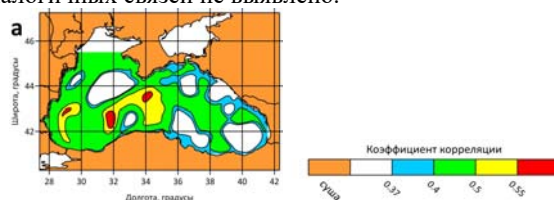


Рисунок 2. Расположение районов Черного моря, где вариации среднего за летний сезон объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики - значимый фактор многолетнего хода среднего уровня их водной поверхности (95% порог значимости корреляции  $=+0.37$ ).

Изучены также расположения районов Черного моря, где значения коэффициента корреляции многолетних изменений средних за тот или иной сезон значений их уровней, а также вариаций средних скоростей движения воздуха через южную границу Европейского сектора Арктики в северном и южном направлении, превышают указанный порог значимости. Указанные исследования выполнены для случаев, когда временной сдвиг между рассматриваемыми процессами равен либо 0, либо 1 год. Показано, что подобные связи значимы лишь для скоростей движения этого воздуха в южном направлении и для летнего сезона. Как пример, на рисунке 3 представлены расположения таких районов Черного моря для летнего сезона и скоростей движения арктического воздуха в южном направлении. Из рис. 3 видно, что вариации средних скоростей движения воздуха через южную границу Европейского сектора Арктики в южном направлении являются значимым фактором много- летнего хода среднего уровня их водной поверхности при обоих значениях временного сдвига между ними. Из рис. 3, а следует, что при нулевом сдвиге по времени между рассматриваемыми процессами подобное имеет место на большей части акватории моря, за исключением его юго-восточной части, где расположен антициклонический круговорот, а также глубоководных районов его Западной части.



Рисунок 3. Расположение районов Черного моря, где вариации средних скоростей движения воздуха через южную границу Европейского сектора Арктики в южном направлении- значимый фактор многолетнего хода среднего уровня их водной поверхности: а) Сдвиг  $=0$ ; б) сдвиг  $=1$  год.

Рис. 3, б показывает, что при временном сдвиге между теми же процессами 1 год наиболее сильная и значимая их корреляция имеет место именно в юго-восточной части моря. Из сравнения рисунка 3Б и 1 видно, что последнее имеет место там, где максимального уровня достигает средняя скорость повышения его уровня. Кроме того значимая корреляция тех же процессов наблюдается и в районе Западной части моря, расположенном к юго-западу от Гераклейского полуострова. Как видно из рисунка 2, в



этом районе значимой является также связь вариаций уровня моря и суммарного объема ледяного покрова Арктики.

Таким образом, связи между вариациями среднего за летний сезон уровня некоторых районов Черного моря, объема ледяного покрова Европейского сектора Арктики и средних скоростей движения воздуха через его южную границу в южном направлении являются статистически значимыми. Последнее подтверждает значимость рассматриваемого механизма влияния климата Арктики на динамику уровня Черного моря и целесообразность учета этого влияния при ее прогнозировании.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 20-45-920007.*

#### **Литература / References:**

1. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time Series Analysis. Forecasting and Control. New York: J. Wiley & Sons, 2015. 709 p.
2. Mankin M. Atmospheric dynamics. London: Cambridge Univ. press, 2011. 512 p.
3. Zakharov V.G., Kononova N.K. Relationship of dynamics of fields of ice drift in the arctic basin and atmospheric circulation northern hemisphere (summer season) // The complex sys., Interdisc. Sci. J. 2015. №1 (2). pp. 45–57.
4. Dee D. The Climate Data Guide: ERA-Interim. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>



---

## **ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДУЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФАКТОРОВ НА ВОДУ И ВОДНУЮ СРЕДУ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ**

***В.В. Цетлин<sup>1</sup>, Г.П. Степанова<sup>1</sup>, О.В. Сергеев<sup>1</sup>, А.С. Перов<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup> Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, v\_tsetlin@mail.ru*

*<sup>2</sup> Российский Университет Дружбы Народов, Москва, avorharp@gmail.com*

Рассмотрена физико-химическая природа воздействия факторов окружающей среды на Биосферу Земли, включая фактор гравитационных лунно-солнечных приливов. Следуя представлениям Чижевского А.Л. в природе биологических процессов, происходящих в земной биоте под влиянием факторов солнечной активности, лежат окислительно-восстановительные реакции. Чижевский А.Л. предполагал, что влияние Космоса на Биосферу может происходить в результате воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ), возникающего на поверхности Солнца из пятнообразующих активных областей [1]. Наряду с изучением закономерностей солнечно-земных связей влияния факторов окружающей среды на биоту [2] А. Л. Чижевский и последующие исследователи [3] при попытках решить проблему отыскания природного источника электромагнитного излучения (ЭМИ), столкнулись с безуспешными поисками «резонансных» частот солнечного ЭМИ. Причины возникшего неприятия идеи А.Л. Чижевского о влиянии Космоса на Биосферу Земли непредвзято настроенными учеными по мнению С. Э. Шноля [4] состояли в следующем: « ... пренебрежимо малы изменения светового потока от Солнца к Земле при изменении числа и характера пятен. Пренебрежимо малыми оказались флуктуации межпланетного поля по сравнению с геомагнитным, даже при сильных магнитных бурях. Трудно было, да и сейчас трудно принять, что этими слабыми возмущениями могут быть обусловлены ощутимые изменения климата и других характеристик биосферы или физиологического состояния животных и растений».

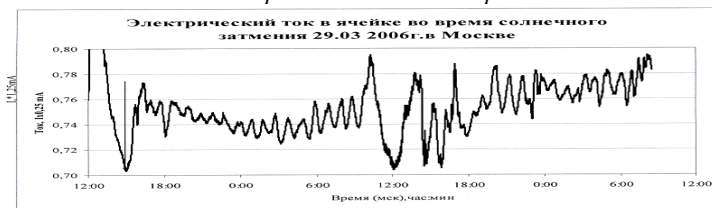
Согласно наблюдениям последних лет получено, что источником возможного доминирующего космофизического фактора, воздействующего на земные живые системы, является *ионосферная плазма*, излучающая электромагнитные волны (ЭМИ) преимущественно радиодиапазона. Экспериментально установлено, что наблюдаемые окислительно-восстановительные реакции, протекающие в воде и в том числе, естественно, в различных коллоидных системах водной среды живых организмов, происходят в результате активации (возбуждения) молекул воды преимущественно при поглощении ЭМИ широкополосного ВЧ диапазона от 100 кГц до ~50 МГц, образующегося в ионосферной плазме [5]. Мощность ЭМИ ионосферной плазмы в ВЧ диапазоне на несколько порядков выше мощности излучения солнечного происхождения. Временная и пространственная вариабельность интенсивности излучения ионосферы связана с изменением электронной плотности ионосферной плазмы Ne, связанной с воздействием таких параметров солнечной активности, как заряженные частицы солнечного ветра и высыпания из хвоста магнитосферы при магнитных возмущениях, рост числа активных областей на поверхности Солнца, описываемых числами Вольфа, а также других космофизических и геофизических факторов. Отметим, что земная атмосфера обладает достаточной прозрачностью для ЭМИ радиодиапазона, которое постоянно регистрируют в окружающем околоземном космическом пространстве и даже у поверхности Земли. В Национальном исследовательском центре Томского государственного университета круглосуточно измеряют потоки и спектр излучения ЭМИ в диапазоне от 1 до 30 МГц [7]. Повидимому, в достижении понимания этого процесса заключена разгадка биологического эффекта Чижевского [1,2]. Таким образом, из факторов, воздействующих на земную Биосферу, практически только электромагнитное излучение, образуемое преимущественно ионами и электронами ионосферной плазмы, по нашему мнению может иметь прямое космическое происхождение и в ближнем околоземном космическом пространстве у поверхности Земли только оно обладает свойством биотропности, т.е. определяющим возможность существования живых организмов. Кроме того, возрос энергетический вклад излучения фоновых техногенных источников, например, ретрансляционных генераторов и приемно-передающих антенн, повсеместно расставленных не только вблизи домов населенных пунктов, но и в тайге и открытых степных просторах, Техногенный фон может на 1-2 порядка и более превосходить природный фон ЭМИ. Хотя согласно нормативным документам такие условия считаются безопасными, а само электромагнитное излучение относят к неионизирующему, в действительности такое представление не точно отражает существо явления поглощения ЭМИ в водных средах. Несмотря на то, что частотный диапазон космического и фонового электромагнитного излучения лежит в далеком от больших резонансов в ВЧ диапазоне, в водной среде организмов может происходить диссоциация молекул и образование в значительных концентрациях таких оксидантов как  $H^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $H_2O_2$ ,  $OH^-$  и других продуктов их дальнейших реакций. Так, изменение водородного параметра pH при этом может достигать 0.1 – 0.15, а окислительно-восстановительный потенциал может как возрастать так и уменьшаться на 10 ÷ 50 мВ. Несмотря на ограниченность времени существования с момента возникновения ионов водорода могут заметно влиять на подвижность ферментных элементов крови и состояние белков, в частности, их агрегирование и образование тромбов. Кроме того, повышение концентрации оксидантов в водной среде организмов неизбежно влияет, как известно, скорость диссоциации оксигемоглобина, на иммунную систему, работоспособность человека и вызывать много других неблагоприятных реакций на оксидантное «заражение» [9]. Исследования, проведенные в научном отделе медико-

биологических проблем Кольского научного центра РАН (г. Апатиты Мурманской обл.) выявили, что свойства воды отражают индивидуальные показатели variability сердечного ритма (BCP), а также психоэмоциональное состояние человека, находящегося в условиях высокого электромагнитного фона Заполярья [7]. Разумеется, каждый живой организм имеет возможность снижать физиологические последствия возрастания концентрации положительных ионов в крови, в мозге и других отделах, органах и тканях человека. Однако резервы индивидуальной антиоксидантной защиты организмов и возможности противостоять усиливающемуся в настоящее время окислительному прессингу факторов окружающей среды оказывается недостаточными. В настоящей работе представлены результаты многолетнего мониторинга динамики ЭМИ биотропных (окислительно – восстановительных) свойств воды и водной среды живых систем, вызванной воздействием электромагнитного излучения окружающей среды. Измерения производились в лабораторных условиях в Институте медико-биологических проблем РАН в Москве, в частности в период с 7 по 24 ноября 2017г при выполнении исследований воздействия на человека условий изоляции в рамках темы СИРИУС. Методика экспериментов описана в [8].

Таким образом, согласно фактам, накопленным в наших многолетних экспериментальных и теоретических исследованиях, показано, что влияние Космоса на Биосферу может происходить не напрямую через воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ), излучаемого как предполагал А.Л. Чижевский, из пятнообразующих активных областей на поверхности Солнца [1, 2]. Опираясь на представления о процессах генерации ЭМИ этого диапазона частот, которая происходит в авроральной области ионосферной плазмы и верхних слоях земной атмосферы, а также высокой прозрачности атмосферы для такого излучения, можно сделать ещё один шаг, необходимый для раскрытия происходящих в окружающем нас мире биофизических механизмов, прозорливо замеченных нашими выдающимися соотечественниками – академиком В.И. Вернадским и А.Л. Чижевским.



*Рисунок 1. Динамика водородного параметра pH и токов в электрохимических ячейках в период со 2 по 24 ноября 2017 г.*



*Рисунок 2. Динамика токов в электрохимической ячейке в лаборатории ИМБП во время солнечного затмения в 15:06 (мск) 29 марта 2006 г.*

### **Литература / References:**

1. Чижевский А.Л. Физико-химические реакции как индикаторы космических явлений. В книге: Космический пульс жизни. М.: Мысль, 1995.

2. Чижевский А.Л. Об одном виде специфически биоактивного или Z- излучения Солнца. В книге: Космический пульс жизни. М.: Мысль, 1995.
3. Горшков Э.С., Иванов В.В., Соколовский В.В. Редокс реакции в космобиологии. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2014. 194 с.
4. Шноль С.Э. Герои, злодеи, конформисты отечественной науки. М.: Норма-Пресс, 2012. 720 с.
5. Будько Н., Зайцев А., Карпачев А., Козлов А., Филиппов Б. Космическая среда вокруг нас. Троицк: ТРОВАНТ, 2006. 232 с.
6. <http://sosrff.tsu.ru>
7. Белищева Н.К., Цетлин В.В., Мартынова А.А. и др. Вода как индикатор космофизических воздействий на организм человека в условиях архипелага Шпицберген // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 2. С. 96–104.
8. Цетлин В.В., Степанова Г.П. Исследования воздействия электромагнитных факторов окружающей среды на воду и внутреннюю среду живых организмов // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 6. С. 70–76.
9. Шмидт Р.Ф., Тевс Г. Физиология человека. М.: Мир, 1996.



## КОНВЕРСИЯ ГИДРАТА $\text{CH}_4$ В ГИДРАТ $\text{CO}_2$ В ПЛАСТАХ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ИНЖЕКЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

**Г.Г. Цыпкин**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, [tsyarkin@ipmnet.ru](mailto:tsyarkin@ipmnet.ru)*

В [1] рассмотрена возможность утилизации  $\text{CO}_2$  в истощенных газовых месторождениях, содержащих гидрат метана, с одновременным извлечением метана. Предполагалось, что диоксид углерода будет храниться в гидратном состоянии. Возможны два способа замещения молекул метана в гидрате молекулами углекислого газа. В первом случае  $\text{CO}_2$  диффундирует в твердый гидрат, а во втором случае происходит диссоциации гидрата метана с образованием свободных молекул воды, которые, реагируя с углекислым газом, образуют гидрат. В последнем случае реакция замещения основана на том, что для диссоциации гидрата метана требуется меньше тепла, чем при образовании того же объема гидрата углекислого газа. Избыток энергии расходуется на прогрев пласта, что приводит к распространению самоподдерживающейся реакции замещения метана углекислым газом в гидрате.

В [2] была рассмотрена одномерная задача инжекции газообразного диоксида углерода с образованием трех областей, насыщенных свободным метаном и его гидратом, свободным метаном и водой, а также  $\text{CO}_2$  и гидратом углекислого газа. При высоких скоростях инжекции в высокопроницаемый пласт фронты сближаются. Поскольку задача многофазная и многокомпонентная, то возникли трудности трактовки полученных результатов. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть задачу в приближении, когда расстояние между фронтами диссоциации гидрата метана и образования гидрата углекислого газа много меньше характерного масштаба задачи. В этом случае можно ввести единый фронт конверсии, на котором происходит преобразование гидрата  $\text{CH}_4$  в гидрат  $\text{CO}_2$ . Тогда промежуточная область метан – вода не рассматривается. Поскольку на фронте имеется как источник, так и сток тепла, то распределение температуры имеет разрыв, а разность температур на фронте является искомой величиной, которая определяется в процессе решения задачи.

Основные уравнения в двух областях представляют собой уравнения фильтрации газов и уравнения теплопроводности. На поверхности конверсии гидрата метана в гидрат углекислого газа законы сохранения энергии и масс газов имеют вид

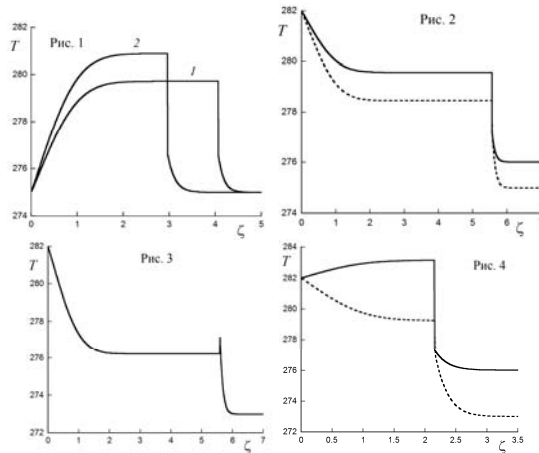
$$\begin{aligned}
 & [(1 - \phi)\rho_s C_s (T_- - T_+) - \phi S_h \delta Q - \phi S_h (\rho_c^{ef} C_p^c T_- - \rho_m^{ef} C_p^m T_+)] V_n = \\
 & \lambda_1 (\text{grad } T)_{n+} - \lambda_2 (\text{grad } T)_{n-} \\
 & \left[ 1 - S_h + S_h \frac{\rho_m^{ef}}{\rho_{m*}} \right] V_n = - \frac{k f(S_h)}{\phi \mu_m} \text{grad } P_{n+} \\
 & \left[ 1 - S_h + S_h \frac{\rho_c^{ef}}{\rho_{c*}} \right] V_n = - \frac{k f(S_h)}{\phi \mu_c} \text{grad } P_{n-}
 \end{aligned}$$

Система дополняется уравнением кривой диссоциации гидрата  $\text{CH}_4$ :  $P_* = P_*(T_*)$

Обозначения общеприняты.  $\delta Q$  – разность между энергиями диссоциации гидрата углекислого газа и гидрата метана. Индексы:  $h$  – гидрат,  $c$  –  $\text{CO}_2$ ,  $m$  –  $\text{CH}_4$ ,  $w$  – вода,  $n$  – нормаль,  $+$  и  $-$  соответствует значениям перед и за фронтам,  $*$  - значение на фронте.

Для постоянных начальных и граничных условий задача допускает автомодельное решение. Подставляя решения в балансовые соотношения на подвижной границе, получаем систему четырех трансцендентных уравнений для определения скоростей движения границы  $V$ , давления на фронте и температур за и перед поверхностью конверсии. При характерных значениях параметров система уравнений расщепляется, и уравнения движения решаются независимо от уравнения энергии. Это отражает тот факт, что движущей силой процесса является гидродинамическая составляющая. Однако термодинамика процесса существенна и определяет границы существования режимов преобразования гидрата метана в гидрат углекислого газа. Часть тепла, выделяемого при образовании гидрата углекислого газа, расходуется на разложение гидрата метана, а часть – на прогрев пласта.

На рис. 1 представлено влияние гидратонасыщенности на распределение температуры  $S_h = 0.4$  (кривая 1) и  $S_h = 0.5$  (кривая 2). Рост гидратонасыщенности приводит к снижению скорости из-за уменьшения проницаемости, а также к росту температуры пласта. Если начальная температура пласта выше, диссоциация происходит при более высокой температуре и, соответственно, при более высоком давлении (рис. 2).



Если начальная температура пласта мала, то при небольшом объеме гидрата ( $S_h = 0.3$ ) выделяемой энергии недостаточно для развития реакции замещения. Это выражается в том, что найденная температура образования гидрата  $\text{CO}_2$  за фронтом опускается ниже температуры диссоциации гидрата  $\text{CH}_4$  (рис. 3). Этот результат

противоречит предположению о том, что разложение гидрата метана происходит под действием выделяемого тепла при образовании гидрата углекислого газа.

При относительно высокой начальной температуре и большом объеме гидрата ( $S_h = 0.6$ ) температура пласта за фронтом реакции может существенно повыситься (рис. 4). В результате найденная температура на фронте будет выше температуры образования гидрата углекислого газа, вычисленной по давлению. Это означает перегрев гидрата за фронтом. В этом случае представленная математическая модель неприменима и должна быть модифицирована с учетом частичного образования гидрата  $CO_2$  на поверхности реакции замещения.

*Работа выполнена по теме государственного задания (номер госрегистрации АААА-А20-120011690131-7).*

#### **Литература / References:**

1. Ohgaki K., Takano K., Sangawa H., Matsubara T., Nakano Sh. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates-phase equilibria for  $CO_2$ - $CH_4$  mixed hydrate system // J. Chem. Eng. Jpn. 1996. V. 29. pp. 478–483.
2. Цыпкин Г.Г. Термодинамические условия образования гидрата  $CO_2$  при инъекции углекислоты в пласт, содержащий гидрат метана // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 5. С. 103–112..



---

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И ДИНАМИКИ ПЕРЕНОСА РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В КОМПАКТНЫХ СОСТАВНЫХ ВИХРЯХ**

***Т.О. Чаплина, Е.В. Степанова***

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, chaplina\_to@inbox.ru*

По мере роста экономики и развития производства в природную среду попадает все большее количество химически активных веществ и соединений, в том числе экологически опасных. Для контроля уровня загрязненности и обеспечения экологической безопасности необходимо оценивать перенос вещества из компактного источника в сложившихся гидрометеорологических условиях.

Рассмотрение процессов переноса вещества в таких сложных системах, какими являются природные водоемы, сопряжено со многими трудностями методического и принципиального характера: чрезвычайной сложностью проведения натурального эксперимента, сложностью и изменчивостью гидрофизических полей океана и гидрометеорологических условий во время исследований, а также в ряде случаев – сложностью и изменчивостью свойств переносимой субстанции. В этой связи особый интерес представляет изучение переноса маркеров в стационарных вихревых и волновых течениях, которые могут формироваться в лабораторных установках с неизменными внешними условиями. В этом случае можно избежать проблем, связанных с пространственной и временной изменчивостью природных источников вихревых образований и непосредственно проследить зависимости характерных параметров течения или характеристик перемещения твердотельных или иных объектов, помещенных в течение.

Представлены результаты экспериментальных исследований вихревых течений и характера переноса в них трех типов маркеров: твердотельных (льда, пластика), несмешивающихся с водой (нефть, масло, дизель) и растворимых (анилиновые красители, уранил). Описание установок для моделирования вихревых течений и изучению процесса переноса вещества и их принципы работы представлены в [1–3].

Перемещения маркеров регистрировались для двух типов вихревого течения. Первый – течение однородной жидкости (рис. 1, а), второй – течение базовой жидкости с небольшой порцией несмешивающейся легкой добавки, образующей в центральной части свободной поверхности «масляное тело» (рис. 1, б, в). При высоких значениях частоты вращения индуктора на свободной поверхности образуется каверна, при дальнейшем увеличении частоты вращения искажаемая волнами различных типов (рис. 1, г). Для первичного изучения закономерностей движения маркеров по поверхности вихревого течения частоты вращения индуктора выбирались таким образом, чтобы поверхностная каверна была наименее выраженной.

Также были проведены эксперименты по изучению движения твердотельных маркеров различной формы на поверхности вихревого течения. Движение маркера, который перемещается по поверхности жидкости, вовлеченной в составное вихревое течение, сводится к комбинации его вращения вокруг вертикальной оси течения и одновременно «верчения» вокруг собственного центра масс (рис. 2). Экспериментально показано, что при помещении твердотельного маркера на поверхность вихря в области его периферии он начинает движение к центру вихря с одновременным обращением его центра масс в том же направлении, в котором вращается вихрь, при этом сам маркер начинает вращаться относительно оси, проходящей через его центр масс, в противоположном направлении. По мере продвижения к центру вихревой воронки маркер попадает в переходную область, пересекает границу между твердотельным и периферийным типами вращения вихря и постепенно меняет собственное вращение относительно центра масс на противоположное, которое сохраняется после полного перехода маркера в область твердотельного вращения, что соответствует предложенной теоретической модели.

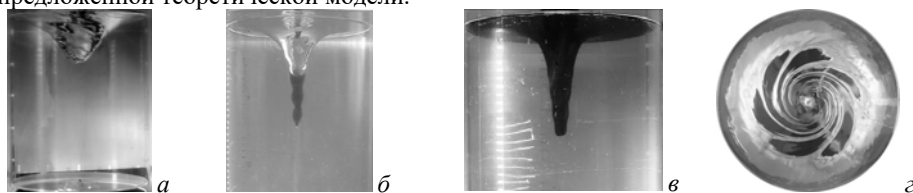


Рисунок 1. Картина течения в составном вихре ( $H = 40$  см,  $R_d = 7,5$  см,  $\Omega_d = 14,2$  с<sup>-1</sup>): а - в) вид сбоку, г) вид сверху (эксперименты выполнены на УНУ ГФК ИПМех РАН).

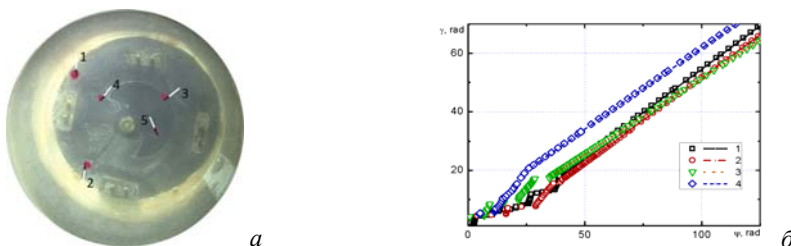


Рисунок 2. Перемещение маркера по свободной поверхности ( $\Omega_d = 3,3$  с<sup>-1</sup>): а) кадры 1 – 5: 5, 20, 27, 35, 44 с наложенные последовательные кадры, б) угол вращения маркера вокруг собственной оси  $\Upsilon$  в зависимости от углового положения  $\psi$ : прямоугольный маркер 1, 2 –  $0,5 \times 1,0 \times 0,3$  см,  $H = 40$  и 20 см.

То есть, твердотельный маркер вращается вокруг собственной оси. Однако, жидкий маркер – растворимая подкраска (анилиновые чернила, штемпельная краска) не вращается относительно собственного центра, а только вытягивается. Проведенные



эксперименты со смешивающейся с водой примесью (чернила, краска, уранил) показали, что вдоль свободной поверхности жидкие частицы движутся по спиральным траекториям, в то же время перенос жидких частиц в толщу жидкости происходит по винтовым нисходящим траекториям, радиус которых слабо изменяется вдоль вертикали [4] (рис. 3, а).

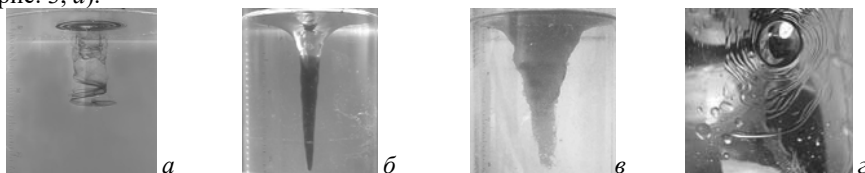


Рисунок 3. Примеры переноса маркеров в вихревом течении: а) растворимый краситель; б) распределение масла в толще жидкости; в) инвертная эмульсия; г) касторовое масло на поверхности вихревого течения.

Несмешивающееся с водой масло (касторовое, подсолнечное) в составном вихре образуют масляное тело в толще (рис. 3, б) и спиральные рукава на поверхности также ориентированные навстречу основному течению (рис. 3, г). При закритических условиях с поверхности раздела масло-вода срываются отдельные масляные капли, образующие прямую водомасляную эмульсию у нижней кромки тела. С увеличением скорости вращения диска образуется инвертная эмульсия – ячейки с оболочками из масла, заполненные водой (рис. 3, в).

Таким образом, перенос маркера в вихревом течении качественно и количественно зависит от его фазового состояния (твёрдый, жидкий) и формы.

*Работа выполнена на стендах УНУ "ГФК ИПМех РАН" при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-01-00116).*

#### Литература / References:

1. Чашечкин Ю.Д., Байдулов В.Г., Бардаков Р.Н., Васильев А.Ю., Городцов В.А., Кистович А.В., Степанова Е.В., Чаплина Т.О. Моделирование течений стратифицированных и вращающихся жидкостей // В сб. «Механика жидкостей». М.: Наука. 2010. С. 277–348.
2. Чаплина Т.О., Степанова Е.В. Вихревые течения с кручением. Лабораторное моделирование // Процессы в геосредах. 2015. № 1. С. 96–105.
3. Окулов В.Л., Меледин В.Г., Наумов И.В. Экспериментальное исследование закрученного потока в кубическом контейнере // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып.10. С. 29–36.
4. Степанова Е.В., Трофимова М.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Структурная устойчивость процесса переноса вещества в составном вихре // Изв. РАН: ФАО. 2012. Т. 48. № 5. С. 1–13.



### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ

*Т.О. Чаплина, Е.В. Степанова*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, chaplina\_to@inbox.ru*

Затопленные струи и сдвиговые потоки часто встречаются в природе и различных технических приложениях, таких как перемешивание, горение, генерация звуковых возмущений и т.д. Затопленная струя несжимаемой жидкости благодаря малому числу определяющих параметров является классическим объектом теоретических исследований и представляет интерес для проведения и модельных экспериментов, которые имеют как общенаучное, так и прикладное значение. Повышенный интерес к теме связан с бурным развитием целого ряда научных отраслей, включая



геофизическую гидродинамику, химическую технологию, атомную энергетику. Исследование затопленной струи также актуально для решения проблем экологии, связанных с выбросом нефтепродуктов в воды океана при повреждениях нефтедобывающего оборудования и других трубопроводных конструкций. В настоящее время широко применяются экспериментальные методы исследования струйных течений [1–3]. Эксперименты, как правило, проводятся в лабораторных условиях, где размеры исследуемой области распространения струйного течения ограничены несколькими метрами.

В данной работе исследовалась затопленная струя воды различной плотности, получаемой путем изменения солености, а так же исследовалось распространение струй несмешивающихся с водой жидкостей (нефти и бензина). Использовались два метода визуализации струи: теневой метод и метод, основанный на муаровом эффекте. Эксперименты проводились при разных положениях резервуара, соответствующих разной скорости истекающей жидкости, а также при различных углах (рис. 1).

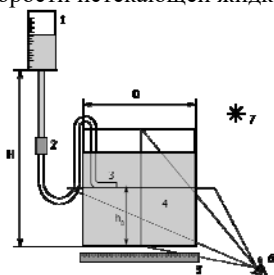


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 – резервуар с жидкостью, 2 – клапан, 3 – трубка (сопло) малого радиуса (2,1 мм), 4 – сосуд с базовой жидкостью (плотность  $S_0$ , кг/м<sup>3</sup>), 5 – линейка, 6 – фото/видеокамера, 7 – источник света.

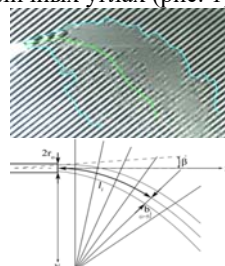


Рисунок 2. Изображение и схема струи ( $r_0$  - радиус сопла (2,7 мм),  $l_i$  - расстояние от сопла вдоль линии центра струи,  $b_i$  - полуширина струи на  $i$ -м делении,  $\beta$  - угол раствора струи,  $v_0$  - начальная скорость).

В результате обработки экспериментальных данных были получены положения центральной линии струи при разных значениях начальной скорости. Характерная зависимость представлена на рис. 3, где плотность базовой жидкости 1020 кг/м<sup>3</sup>, плотность втекающей жидкости 1050 кг/м<sup>3</sup>. С увеличением начальной скорости центральные линии оказываются более пологими.

При описании динамики затопленной струи в работе рассмотрена аналогия с движением тела, брошенного под углом к горизонту. Уравнение траектории движения тела, брошенного из точки  $(x_0, y_0)$  горизонтально со скоростью  $v_0$  в поле с вертикальным ускорением  $\xi$ , выглядит следующим образом:

$$y - y_0 = \frac{\xi}{2v_0^2} (x - x_0)^2 \quad (1)$$

Отсюда выражаем начальную скорость через коэффициент  $C$ :

$$C = \frac{\xi}{2v_0^2}, \quad v_0 = \sqrt{\frac{\xi}{2C}} \quad (2)$$

Определим ускорение  $\xi$ , действующее на частицу жидкости затопленной струи. Пусть  $\rho_0$  – плотность окружающей жидкости,  $\rho$  – плотность жидкости в струе,  $V$  – объем частицы,  $m$  – ее масса. На частицу действуют сила тяжести  $mg$  и сила Архимеда  $F_A$ . По второму закону Ньютона

$$F_A - mg = m\xi \quad (3)$$

Тогда  $\rho_0 gV - \rho Vg = \rho V\xi$ ,  $\xi = g(\rho_0 - \rho) / \rho$ .

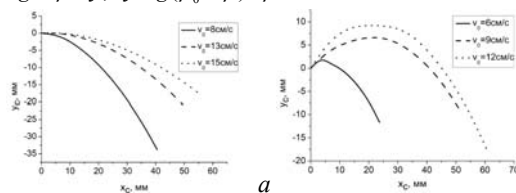


Рисунок 3. Центральные линии струи ( $\rho_0 = 1020 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$ ) при различных скоростях истечения. Угол направления скорости истечения к горизонту: а)  $0^\circ$ ; б)  $30^\circ$ .

Для скорости истечения жидкости окончательно получаем

$$v_0 = \sqrt{\frac{g(\rho_0 - \rho)}{2C\rho}} \quad (4)$$

Число Рейнольдса определяется соотношением ( $d$  – диаметр сопла,  $\mu$  – динамическая вязкость вытекающей жидкости)

$$\text{Re} = \frac{\rho v_0 d}{\mu} \quad (5)$$

Расчитанные параметры для серии экспериментов приведены в Табл 1.

Таблица 1. Параметры затопленной струи.

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$H$ , см	$\alpha$ , °	$C$	$\beta$ , °	$V_{\text{орач}}$ , мм/с	$V_{\text{экс}}$ , мм/с	$a$	$l_{\text{нач}}$ , мм	Re
1005	1020	100	0	0.008	11.04	95.26	97.03	0.06	32	514
1010	1020	100	0	0.005	15.59	96.68	94.92	0.08	22	524
1010	1000	100	0	0.004	14.19	116.25	114.30	0.07	24	630
1010	1000	100	15	0.006	21.80	89.40	133.94	0.12	15	485
1010	1000	100	30	0.008	29.20	75.64	101.54	0.16	11	410
1030	1000	100	0	0.007	14.23	146.39	143.63	0.07	24	809
1030	1000	100	15	0.016	19.28	93.43	113.71	0.10	18	517
1030	1000	100	30	0.025	30.36	75.72	110.26	0.17	10	419
1050	1020	100	0	0.008	11.31	129.02	114.72	0.06	31	727
1050	1020	100	15	0.013	21.80	104.99	105.06	0.12	15	592
1050	1020	100	30	0.016	21.80	92.62	103.76	0.12	15	522

Проведено сравнение рассчитанных и оцененных по экспериментальным данным значений скорости истечения струи, показавшее удовлетворительное совпадение. Все полученные результаты устойчиво воспроизводятся с сохранением как функциональных зависимостей, так и числовых значений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00116).

#### Литература / References:

1. Wen Q. et al. Structure Analysis of a Low Reynolds Number Turbulent Submerged Jet Interacting With a

- Free Surface // J. Fluids Eng. 2014. V. 136. №. 10. pp. 101–104.
2. Sodjavi K. et al. PIV and electrodiffusion diagnostics of flow field, wall shear stress and mass transfer beneath three round submerged impinging jets // Exp. Therm. Fluid Sci. 2016. V. 70. pp. 417–436.
  3. Shao D. et al. Flow patterns and mixing characteristics of horizontal buoyant jets at low and moderate Reynolds numbers // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. V. 105. pp. 831–846.



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БЕЛОМ МОРЕ С УЧЕТОМ ЭКОСИСТЕМЫ МОРСКОГО ЛЬДА

*И.А. Чернов<sup>1</sup>, А.В. Толстиков<sup>2</sup>, Н.Г. Яковлев<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск,  
chernov@krc.karelia.ru*

<sup>2</sup> *Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск,  
tolstikov@nwpi.krc.karelia.ru*

<sup>3</sup> *Институт вычислительной математики РАН, Москва, nick\_nick\_yakovlev@mail.ru*

Быстрое развитие вычислительной техники за последнее десятилетие — рост производительности и числа процессоров и процессорных ядер, емкости устройств хранения данных, скорости передачи данных, рост доступности и снижение стоимости — открыло новые возможности численного моделирования сложных систем, в том числе в науках о Земле. Тем не менее, детальное комплексное описание системы моря все еще является серьезным вызовом и требует значительной мощности и большого количества процессорного времени. Необходимо описывать трехмерные течения, динамику температуры и солености морской воды, меняющийся уровень моря, лед, состоящий из льдин различной толщины и площади, неравномерно покрытых снегом. При включении в модель пелагической экосистемы приходится описывать также динамику различных групп планктона (автотрофы, гетеротрофы, бактерии), органические и неорганические вещества в воде, а также потоки вещества между этими группами и извне [1].

Чисто пелагическая модель, в которой органические останки реминерализуются бактериями водной толщи, не может быть адекватной в мелководном море (таком, как Белое, а также это справедливо для шельфа Северного Ледовитого океана), поскольку значительная часть останков достигает дна; осаждение детрита составляет порядка 5 метров в сутки относительно воды. Приходится принимать во внимание обмен вещества с донными отложениями и описывать бентосную экосистему или, по меньшей мере, реминерализацию органического вещества на дне [2].

15 марта условного года; показаны линии уровня средней толщины льда (м).

Морской лед является важным фактором, ограничивающим развитие планктона, поскольку эффективно ослабляет поток солнечной радиации в воду, особенно при наличии снега. Сложная структура морского льда с переменным альбедо, полыньями, распределением льдин и снежного слоя на льду по толщине существенно усложняет задачу. При этом правильное описание морского льда становится критически важными для динамики экосистемы. В морях, в которых летом льда мало или нет совсем, очень важную роль играет короткий промежуток времени весной, когда световой день уже достаточно велик, а лед активно тает. Впрочем, этот интервал может быть также важен для Северного Ледовитого океана, поскольку площадь и толщина льда снижаются, а длина светового дня растет.

Наконец, известно, что морской лед также обладает собственной экосистемой [3]. Соленый лед содержит поры и каналы, наполненные водой с повышенной

концентрацией соли. Если относительный объем этих полостей достаточно велик, так что они соединены между собой и с толщей воды подо льдом, они населены живыми организмами, среди которых можно выделить фитопланктон, зоопланктон и бактерии. Также там присутствует биогенное вещество, органические останки и т.п. Талые лужи на льду и его нижняя поверхность также могут быть населены. Правильное описание льда и особенно его оптических свойств становится еще более важным. При таянии льда вещество и органические останки (а возможно, и живые организмы) из полостей попадают в верхний слой воды, воздействуя на пелагическую экосистему (процесс, известный как seeding).

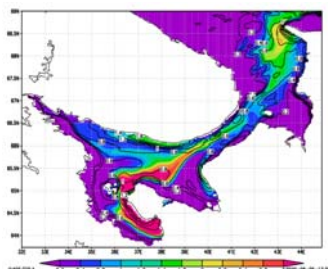


Рисунок 1. Концентрация хлорофилла-а в биологически активном слое льда,  $\text{мг}/\text{м}^2$  (цвет).

В докладе будут обсуждаться вопросы численного моделирования системы Белого моря включающую воду, лед, пелагическую экосистему, обмен веществом с морским дном и экосистему биологически активного слоя морского льда. Совместная модель JASMINE основана на модели FEMAO, целенаправленно разработанной для Северного Ледовитого океана и хорошо описывающей систему морского льда. Модель морской экосистемы BFM [4] ([bfm-community.eu](http://bfm-community.eu)) описывает различные группы организмов и взвешенное и растворенное вещество набором скалярных полей, а биологические процессы - обменом вещества между ними. Система морского льда также описывается несколькими группами двумерных скаляров с потоками вещества между ними.

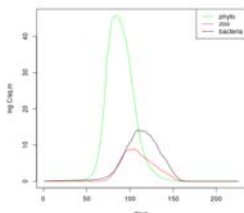


Рисунок 2. Средние по акватории концентрации углерода в биологически активном слое льда: в составе фито-, зоопланктона и бактерий. Условный год.

Характеристики морской воды (температура, соленость, плотность, освещенность и т.п.) и морского льда (соленость, освещенность подо льдом, толщина и еще ряд параметров) поставляется моделью динамики моря. Она же осуществляет расчет адвекции скаляров. Обратное воздействие экосистемы на гидро- и термодинамику также возможно из-за изменения оптических свойств воды и льда.

В докладе будут представлены первые результаты расчетов совместной модели динамики вод, льда, экосистемы пелагиали и льда с учетом обмена веществом с бентосом на примере Белого моря. Шаги сетки составляют 3 км, шаг по времени 5 минут. Результаты выглядят разумно: активная первичная продукция наблюдается с

середины февраля и заканчивается, когда тает лед. Вторичная продукция следует за первичной с некоторой задержкой. На рис. 1 показано распределение толщины льда и концентрация хлорофилла во льду в середине марта, а на рис. 2 – концентрация углерода в составе различных типов планктона, населяющего лед.

*Работа поддержана грантом РФФИ 18-05-60184.*

### **Литература / References:**

1. Vichi M., Pinardi N., Masina S. A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: theory // J. Mar. Sys. 2007. V. 64. pp. 89–109.
2. Soetaert K., Middelburg J.J., Herman P.M., Buis K. On the coupling of benthic and pelagic biogeochemical models // Earth-Sci. Rev. 2000. V. 51 (1–4). pp. 173–201.
3. Tedesco L., Vichi M. Sea ice biogeochemistry: A guide for modellers. PLoS ONE 9(2), 2014. e89217.
4. Vichi M., Lovato T., Butenschön M., Tedesco L., Lazzari P., Cossarini G., Masina S., Pinardi N., Solidoro C., Zavatarelli M. The Biogeochemical Flux Model (BFM): Equation Description and User Manual. BFM version 5.2. BFM Report series N. 1, Release 1.2, 2020, Bologna, Italy, <http://bfm-community.eu>



---

## **ОТКРЫТАЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЙ ЗАКОН ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**

**Ю.П. Чукова**

*Краснопресненский региональный фонд охраны природы и здоровья населения, Москва,  
y.chukova@mtu-net.ru*

Все мы знаем, что энергия не исчезает и не возникает вновь, она только переходит из одного вида в другой. Для характеристики успешности этого перехода исследователи ввели понятие КПД (коэффициент полезного действия). Он очень часто используется для рукотворных систем и крайне редко для нерукотворных объектов. По существу КПД является главной характеристикой любого технического устройства. Именно необходимость повышения КПД паровых машин привела к появлению новой науки – термодинамики, главным объектом изучения которой на протяжении ста лет были тепловые машины, КПД которых удалось поднять в несколько раз (до 40%).

В начале XX века после открытия М.Планком кванта действия приоритеты сдвигаются в область излучающих систем. На передовом фронте науки появляется люминесценция и люминесцентные лампы, в которых квантовый выход очень высок, и становится актуальным вопрос о термодинамическом пределе КПД фотолюминесценции, который был успешно решён Л. Ландау в 1946 г. [1], а затем М.В. Вайнштейном для электролюминесценции в 1960 г. [2].

Рассмотрение других видов люминесценции (например, биолюминесценции и хемилюминесценции) привело к тому, что автоматически оказался решённым вопрос о КПД преобразования энергии электромагнитного излучения в свободную энергию Гельмгольца. Этот факт имел принципиальное значение, потому что в работу в изотермических процессах может быть преобразована только свободная энергия. В физике самым главным примером такого преобразования является преобразование энергии электромагнитного излучения солнечными батареями. Процессы, протекающие с увеличением свободной энергии Гельмгольца, называются эндэргическими процессами. С точки зрения жизни на Земле эти процессы являются самыми главными. КПД таких процессов на основании второго закона квантовой термодинамики не может превышать единицу (аналогично КПД тепловой машины).

Как известно, любая теория проверяется практикой. Но когда теория эффективности преобразования энергии электромагнитного излучения была построена (70-ые годы XX века), разработка солнечных элементов только началась в передовых лабораториях мира. Надо было подождать 10-20 лет, но ждать не хотелось. Именно в это время родилась мысль, посмотреть работает ли физический закон, полученный для неживой материи, в сфере живых существ и их сообществ, населяющих нашу планету.

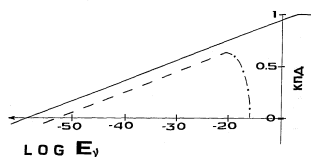
Результат превзошёл все ожидания. Самым удивительным оказалось то, что фундаментальный закон эффективности преобразования энергии электромагнитного излучения в другие виды энергии отчётливо просматривался даже в тех процессах и системах, к которым понятие КПД никогда не применялось, и более того, даже сейчас не понятно, как его можно применить к такому сложному процессу, как, например, зрение человека. Между тем, фундаментальный термодинамический закон позволил ответить на ряд вопросов, над которыми безуспешно бились физики, химики, биологи и медики более 100 лет [3–9]. Сюда, прежде всего, относятся вопросы: 1) почему глаз имеет нулевую чувствительность в максимуме солнечного излучения, 2) почему существует эффект Пуркине, 3) какому закону подчиняется динамическая зависимость работы глаза. Аналогично выглядит ситуация с фотосинтезом растений, а процессы фотодвижения простейших организмов позволили пролить свет на главный момент эволюции жизни на Земле: изменение атмосферы планеты Земля, которая 3 миллиарда лет назад из восстановительной стала окислительной, и создались условия для появления на Земле не только флоры и фауны, но и человека. Наиболее восхитительно то, что все эти многочисленные застарелые проблемы позволила решить одна-единственная формула, которая поставила их на одну общую энергетическую платформу.

На простых физических примерах (солнечные преобразователи) без особых усилий можно понять роль скорости генерации энтропии в необратимых изотермических процессах. Пока воздействие на систему мало, скорость генерации энтропии возрастает линейно с ростом силы воздействия. Это позволяет сохранять паритет между двумя разными процессами: полезного использования поглощённой энергии и превращения её в тепло, которое бесполезно рассеивается в окружающее пространство. Однако при дальнейшем росте поглощения закон преобразования изменяется: превращение световой радиации в тепло начинает превалировать над полезным преобразованием, вследствие чего КПД преобразования начинает падать, и эндоэргический процесс сходит к нулю, что для живого существа означает гибель.

Схематически сказанное может быть представлено для коротковолнового излучения (излучение Вина) рис.1, где по оси абсцисс отложена сила воздействия (спектральная плотность излучения  $E_\nu$ , интенсивность, поглощённая мощность, освещённость и т.д.) в логарифмическом масштабе, а по оси ординат – КПД в линейном масштабе. Сплошная линия даёт термодинамический предел КПД для обратимых процессов, пунктирная линия – это КПД реального процесса с линейной необратимостью, а штрих-пунктир – это КПД реального процесса с нелинейной необратимостью.

Как видно из рис.1, эндоэргический процесс имеет начало и конец, и эти точки могут быть рассчитаны термодинамическим методом не только для хорошо изученных процессов, но иногда даже для слабоизученных процессов. Данные рис.1 могут быть проанализированы с разных позиций и в разных аспектах. В настоящее время наиболее актуальным является вопрос экологической безопасности планеты в условиях глобализации всех процессов. С этой позиции наибольший интерес представляет максимум на кривой реальных КПД. В этой точке по существу кончается

изотермический процесс, ибо температура системы начинает повышаться, хотя сначала это изменение мало и не имеет ярко выраженного внешнего проявления. Именно поэтому наиболее тревожным фактором современного момента в истории нашей цивилизации является потепление климата, которое вполне отчётливо фиксируется все последние годы.



*Рисунок 1. Зависимость КПД изотермического эндоэргического процесса от спектральной плотности поглощённого излучения для обратимого процесса (сплошная линия), процесса с линейной необратимостью (пунктир) и процесса со сверх линейной необратимостью (штрих-пунктир).*

Но это только начало, ибо изменение температурного режима планеты неизбежно приведёт к изменению всех систем, в том числе в микромире. Поэтому эпидемии и пандемии будут обязательными спутниками дальнейшего развития нашей цивилизации, и успешность борьбы с ними будет весьма относительной, пока учёные не поймут, где кроется корень зла. Исходя из термодинамических рассуждений, он связан с превышением используемой энергии в мировом масштабе. Положительных изменений можно ожидать только при сокращении энергопотребления в мировом масштабе.

#### **Литература / References:**

1. Ландау Л.Д. О термодинамике люминесценции. М.: Наука, 1969, Т. 2. С. 26–31.
2. Weinstein M.A. Thermodynamic Limitation on the Conversion of Heat into Light // J. Optical Soc. Am. 1960. V. 50 (6). pp. 597–602.
3. Chukova Yu.P. Advances in nonequilibrium thermodynamics of the systems under electromagnetic radiation. Moscow, Khrizostom, 2001. 118 p.
4. Чукова Ю.П. Эффекты слабых воздействий. Термодинамический, экспериментальный (биологический и медицинский), социальный, законодательный, международный и философский аспекты проблемы. М., 2002.
5. Идеи Чижевского в свете представлений о слабых воздействиях электромагнитного излучения // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7. С. 48–61.
6. Чукова Ю.П. Закон Вебера-Фехнера. К 150-летию издания книги Г.Т. Фехнера «Элементы психофизики». М.: ЗФО МП «Гигиена», 2009.
7. Chukova Yu.P. Interactions of science, technology and medicine: the electromagnetic radiation during the 20th century // In: A Bridge between Conceptual Frameworks. Series: History of Mechanism and Machine Science. V. 27. *Pisano R.* (Ed.). Springer, 2015. pp. 85–111.
8. Чукова Ю.П. Введение в квантовую термодинамику необратимых изотермических процессов. М.: Мегалполис, 2018. 480 с.
9. Чукова Ю.П. От М. Планка, А. Эйнштейна и Л. Ландау до Римского клуба. М.: Мегалполис, 2020. 216 с.



## ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СКЛОНА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

3.3. *Шарафиев, Д.В. Павлов*

*Институт динамики геосфер РАН им. М.А. Садовского, Москва*

Выполненный анализ имеющихся сведений о строении и генезисе оползней показывает, что неустойчивость склонов в основном определяется возникновением сдвигового разрушения при оползании и скольжении геоматериала. Считается, что одним из основных триггеров надводных и подводных оползней являются сейсмические колебания, хотя в большинстве случаев эта связь остается лишь предположением на основе косвенных признаков. В этом случае оползание грунта происходит при совокупном действии статической (сила тяжести) и динамической нагрузок. Инженерные методы оценки устойчивости склонов хорошо отработаны. Количественным показателем степени устойчивости в методах предельного равновесия является коэффициент устойчивости, равный отношению сумм всех удерживающих  $R$  и сдвигающих  $T$  сил

$$FS = \sum R / \sum T \quad (1)$$

Склон или его морфологический элемент считается устойчивым, если его коэффициент устойчивости выше единицы ( $FS > 1$ ). Методы оценки устойчивости откосов и склонов, основанные на теории предельного равновесия, рассматривают напряженное состояние грунтового массива в предельном равновесии. При этом динамическое воздействие учитывается, как правило, весьма приближенно, путем добавления к ускорению силы тяжести величины максимального ускорения в сейсмической волне  $a_s$  [1]. Такой «квазистатический подход» предполагает постоянное действие ускорения  $a_s$ , что, очевидно, приводит к недооценке устойчивости склона при коротких импульсных воздействиях.

В настоящей работе моделировалась начальная стадия относительного смещения участка склона при импульсном воздействии на надводные и подводные склоны.

Эксперименты со склонами из различных геоматериалов проводились на уникальных ударных лабораторных установках для исследования инициирования неустойчивости склонов при субвертикальном и субгоризонтальном динамическом воздействии. Диапазон изменения параметров воздействия составляет по максимальной массовой скорости (PGV): от 0,003 м/с до 1,3 м/с, а по максимальному ускорению (PGA) – от 0,01 g до более чем 170g.

Параметры воздействия и движения оползня относительно основания склона контролировались акселерометрами, а картина разрушения фиксировалась с помощью кино- и фото- съемки. Использование акселерометров позволяло обнаружить развитие относительного движения соскальзывающей массы даже в тех случаях, когда визуально деформация не была видна. На рисунке 1 показаны скорости движения вдоль склона в потенциально обрушаемой части модели (блок) и внутри тела склона. Можно видеть, что в этом случае эпюры практически совпадают как по форме, так и по амплитуде.

В случае, показанном на рис. 2, вертикальные компоненты движения практически совпадают, тогда как составляющие, направленные вдоль склона, заметно различаются. В момент времени ( $t \sim 5.6675$  с) блок начинает «отставать» от склона. Это значит, что наблюдается относительное перемещение частей склона, которое может привести к возникновению оползня.

Проведенные эксперименты по инициированию наземных и подводных склонов, выполненных из геоматериалов с различными свойствами, включая и опыты с



жесткими блоками, лежащими на наклонном основании, позволили установить критические значения параметров динамических воздействий на лабораторные надводные и подводные склоны. Показано, что существуют минимальные величины  $PGA$  и  $PGV$ , при которых наблюдаются необратимые деформации склона. Если ускорение ниже минимального значения  $PGA_{min}$ , то значимых необратимых деформаций не наблюдается при любых значениях  $PGV$ . Если величина массовой скорости ниже  $PGV_{min}$ , то при  $PGA > PGA_{min}$  наблюдаются необратимые деформации, так что склон может быть разрушен при повторном воздействии. Значение минимального пикового ускорения, при котором наблюдалось образование оползня, по крайней мере, в несколько превышает величину критического ускорения, рассчитанную на основе статического коэффициента устойчивости  $FS$ . Эффект вертикального воздействия на склон существенно слабее, чем эффект горизонтального воздействия как для надводных, так и для подводных склонов.

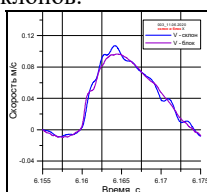


Рисунок 1. Фрагменты эпюр скорости смещения (компонента вдоль склона), зарегистрированные в потенциально обрушаемой части модели и внутри склона (относительного движения частей склона практически нет) Положительное направление соответствует скорости смещения вверх по склону.

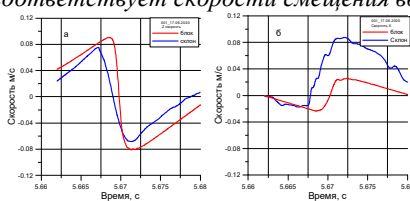


Рисунок 2. Фрагменты эпюр вертикальной (а) и горизонтальной, вдоль склона (б) составляющей скорости смещения, зарегистрированные в потенциально обрушаемой части модели и внутри склона. Положительное направление соответствует скорости смещения вверх по склону.

Параметры инициирования оползня в экспериментах с подводными склонами не демонстрируют принципиального отличия от опытов с «сухими» склонами. Наличие воды резко снижает запас устойчивости склона. Главным образом это происходит из-за действия архимедовой выталкивающей силы. В то же время, при близких коэффициентах  $FS$  критические параметры для подводных и надводных склонов сопоставимы.

Характер движения грунта после инициирования в опытах под водой сильно отличается от «субаэральных» склонов. Во многих случаях инициирование сопровождается задержкой во времени в несколько секунд, либо начало движения оказывается довольно медленным, но затем материал постепенно разгоняется. Эффективная толщина сдвинутого материала при подводных событиях оказывается меньше, чем толщина оползней в опытах с сухими склонами.

## Литература / References:

1. Фоменко И.К., Захаров В.С., Самаркин-Джарский К.Г., Сироткина О.Н. Учет сейсмического



## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА УСТАНОВКЕ ИСТНН ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОЛЛЕКТОРАХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

***Н.И. Шевцов***

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, red3991@yandex.ru*

Характерной особенностью эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ) является циклическое изменение пластового давления при закачке и отборе газа [1]. Поскольку вмещающие продуктивные пласты-коллекторы во многих случаях представлены слабосцементированными песчаниками, то основной проблемой при работе скважин ПХГ является борьба с пескопроявлениями, приводящими к снижению дебита скважин и абразивному износу подземного и наземного оборудования [2, 3].

Оценка состояния призабойной зоны пласта при эксплуатации подземных хранилищ газа и выявление причин пескопроявления является важнейшей задачей научных и практических исследований, направленных на создание новых технологий.

В литературе за основную причину выноса песка в скважину принимают разрушение призабойной зоны пласта (ПЗП), которая является следствием возникновения напряжений в породе) [4, 5]. Разрушение ПЗП происходит, когда эти напряжения превышают предел прочности горной породы.

С целью уменьшения действующих в ПЗП напряжений при отборе газа используются весьма малые рабочие депрессии, обычно не превышающие 0,5–1 МПа. Тем не менее, даже при столь малых значениях депрессий скважинах ПХГ наблюдаются явления пескопроявления.

Для проверки данного утверждения на установке ИСТНН были проведены эксперименты по физическому моделированию деформационных и фильтрационных процессов в ПЗП под действием депрессий и репрессий при отборе и закачке газа. Опыты проводились на кубических образцах породы из коллекторов четырех ПХГ. В образцах создавались напряжения, возникающие в окрестности необсаженной скважины при циклическом создании в скважине депрессий и репрессий в 1 и 2 МПа [6]. В ходе экспериментов измерялись деформации образцов в трех направлениях, а также изменение проницаемости образца в одном из направлений.

На рис.1 приведены результаты испытания образца породы КЩ-5 из действующего в настоящее время ПХГ. В ходе эксперимента промоделированы 7 циклов создания репрессии/депрессии  $\Delta p = 1$  МПа на забое скважины. На рис. 1 показаны кривые деформирования образца и изменение его проницаемости по одной из осей. В ходе опыта образец остался целым. Не разрушились и другие образцы, в том числе при моделировании на забое скважины репрессии/депрессии  $\Delta p = 2$  МПа.

Результаты экспериментов дают основание полагать, что имеется другой механизм, приводящий к возникновению на стенках скважин напряжений, достаточных для инициации разрушения породы в ПЗП и проявления пескопроявления.

Выполненный на основе геомеханического подхода анализ возникающих в пластах ПХГ напряжений показал, что основное влияние на процессы деформирования и разрушения горных пород в окрестности скважин (особенно горизонтальных) оказывают напряжения, возникающие вследствие изменения природного напряженного состояния в глубине массива при существенном снижении и увеличении пластового

давления в коллекторе ПХГ.

С учетом выполненного анализа были составлены программы нагружения образцов пород на установке ИСТНН по физическому моделированию деформационных и фильтрационных процессов, возникающих в окрестности скважин ПХГ при изменении природного напряженного состояния в глубине массива при закачке и отборе газа. По составленным программам нагружения на установке ИСТНН было проведено физическое моделирование деформационных и фильтрационных процессов в ПЗП под действием знакопеременных нагрузок. Моделирование было выполнено для условий пока не введенного в эксплуатацию ПХГ, при эксплуатации которого пластовое давление, составляющее в исходном состоянии 13.1 МПа, меняется в пределах от 9 до 16 МПа.

На рис. 2 показана программа испытания одного из образцов и изменение его проницаемости в ходе опыта. На рис.3 приведены кривые деформирования. Из рис. 2 видно, что образец разрушился при напряжениях, отвечающих максимальному снижению пластового давления при отборе газа. Это можно считать подтверждением правильности выбранной геомеханической модели возникновения в коллекторах ПХГ напряжений при закачке и отборе газа.

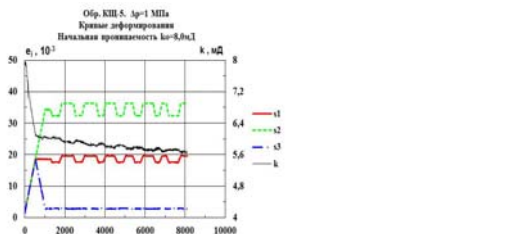


Рисунок 1. Результаты испытания образца КШ-5.

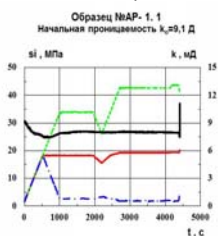


Рисунок 2. Программа испытания образца AP-1.1 и изменение его проницаемости в ходе опыта.

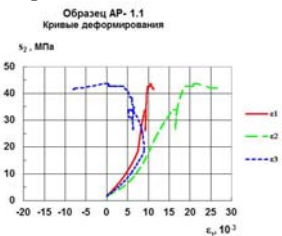


Рисунок 3. Кривые деформирования образца AP-1.1 в ходе опыта.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы № АААА-А17-117021310371-9.

### Литература / References:

1. Каримов М. Ф. Эксплуатация подземных хранилищ газа. М.: Недра, 1981. 248 с.
2. Сьюмен Д., Эллис Р., Снайдер Р. Справочник по контролю и борьбе с пескопроявлениями в скважинах. М.: Недра, 1986. 176 с.
3. Зотов Г.А., Динков А.В., Черных В.А. Эксплуатация скважин в неустойчивых коллекторах. М.: Недра, 1987. 172 с.
4. Башкатов А. Д. Предупреждение пескования скважин. М.: Недра, 1981. 176 с.
5. Пятахин М.В. Геомеханические проблемы при эксплуатации скважин. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2012. 266 с.

6. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Geomechanics of Oil and Gas Wells. Advances in Oil and Gas Exploration and Production. Springer International Publishing Cham: Switzerland, 2020. 166 p.



## **ЭВОЛЮЦИЯ ДНА В ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ МАДАГАСКАРА И ИНДИИ**

**А.А. Шрейдер, А.Э. Сажнева, М.С. Клюев, А.Л. Бреховских, Е.И. Евсенко,  
О.В. Гринберг**

*Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, aschr@ocean.ru*

Важнейший вопрос эволюции дна Индийского океана после раскола Гондванского суперматерик обсуждается в различных литературных источниках, в том числе детали раскола соединения Мадагаскара и Индии. Удалось установить, что для целей палеогеодинамического анализа наилучшим образом подходят наиболее крутые участки изобат 0.6–2 км с наименьшей мощностью осадков или вообще без них. Со стороны Мадагаскара – это изобата 1.3 км, а со стороны Индии- 0.8 км. Для этих участков рассчитан конечный эйлеров полюс, и составлена палеогеодинамическая реконструкция. Восстановлена ось откола Мадагаскара от Индии. Было так же установлено, что имеется разность в 500м в заглуплении изобат. Это отражает факт сползания по плоскости сквозь литосферного раскола и, тем самым, заглупления в процессе растяжения индо-мадагаскарской области Гондваны и откола периферических районов континентальной коры Мадагаскара в соответствии со схемой Б. Вернике [1].

Проведенные реконструкции позволили, тем самым, восстановить фрагменты палеобатиметрии в пределах восточного борта Мадагаскара. При этом периферические районы борта располагались гипсометрически близко к поверхности морфоструктур западного Индостана.

*Часть работы, связанная с усовершенствованием методики кинематических расчетов, выполнена в рамках государственного задания № 0149-2019-0005.*

*Отдельные методические вопросы прорабатывались в рамках Программы Президиума РАН проект №0149-2018-0026. Основная часть исследования выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, проект № 20-05-00089*

### **Литература / References:**

1. Wernike B. Uniform sense normal simple shear of the continental lithosphere // Can. J. Earth Sci. 1985. V. 22. pp. 108 – 125



## **ГЕОХРОНОЛОГИЯ И КИНЕМАТИКА ДНА КОТЛОВИНЫ ПОУЭЛЛ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ МОРЯ УЭДДЕЛЛА**

**А.А. Шрейдер<sup>1</sup>, А.Э. Сажнева<sup>1</sup>, М.С. Клюев<sup>1</sup>, А.Л. Бреховских<sup>1</sup>, Ф. Бохойо<sup>2</sup>,  
Х. Галиндо-Зальдивар<sup>3</sup>, Ц. Моралес<sup>4</sup>, Е.И. Евсенко<sup>1</sup>, О.В. Гринберг<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, aschr@ocean.ru*

<sup>2</sup> *Испанский институт геологии и минералогии, Мадрид, Испания*

<sup>3</sup> *Гранадский университет, Гранада, Испания*

<sup>4</sup> *Андалузский Институт наук о Земле, Гранада, Испания*

По результатам ранее не публиковавшихся исследований последних лет испанского научно-исследовательского судна «Гесперида» выделены новые и, при необходимости, реинтерпретированы известные ранее последовательности линейных

магнитных аномалий в котловине Пуэлла. Проведено моделирование аномалий магнитного поля с позиций тектоники литосферных плит и составлена современная версия электронной карты-схемы геохронологии дна котловины. Определение эйлеровых полюсов и углов поворота, проводимое по оригинальным программам, разработанным в ИО РАН, позволило впервые провести детальный кинематический анализ особенностей процесса разрастания дна на основе оригинальных технологий расчета мгновенных скоростей спрединга, и асимметрии процесса разрастания дна, включая определение соответствующих погрешностей. Разрастание дна началось во время хрона C17n.3n (38.093-38.159 млн. лет) и остановилось во время хрон C11n.2n (29.527 – 29.9701 млн лет). Спрединг шел со средней скоростью 1 см/год. На основании проведенных расчетов восстановлена детальная палеогеодинамика откола Оркнейского микроконтинента от Антарктического полуострова.

*Часть работы, связанная с усовершенствованием методики кинематических расчетов, выполнена в рамках государственного задания № 0149-2019-0005. Отдельные методические вопросы прорабатывались в рамках Программы Президиума РАН проект №0149-2018-0026. Основная часть исследования выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, проект № 20-05-00089*



## **СВОБОДНЫЕ И СВЯЗАННЫЕ ВОЛНЫ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ**

***М.Н. Штремель, С.Ю. Кузнецов***

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, mnshtremel@gmail.com*

Изменение симметрии волн в береговой зоне моря приводит к возникновению градиентов расхода наносов и, как следствие, к переформированию профиля подводного склона, так что исследование закономерностей трансформации волн в береговой зоне имеет важное прикладное значение для предсказания возникновения размывов и аккумуляции на пологих берегах, сложенных рыхлыми отложениями.

При распространении из открытых акваторий в сторону берега волны достигают промежуточной глубины, где начинают трансформироваться с изменением формы профиля вследствие околорезонансных трехволновых взаимодействий (согласно исследованиям [1], трехволновые взаимодействия наблюдаются в диапазоне относительных глубин  $0.022 < h/L < 0.37$ ). Этот процесс характеризуется периодическим по пространству обменом энергией между основной и высшими гармониками (рис. 1) с периодом, близким к длине волны, и зависящим от расстройки по волновому числу [2]. Расстройка определяется как отклонение значений волнового числа второй гармоники от удвоенного волнового числа первой гармоники (от полного резонанса). Периодический по пространству рост и затухание второй гармоники за счет обмена энергией с основной неоднократно наблюдался в лабораторных и полевых экспериментах (например, в ходе полевого эксперимента «Шкорпиловцы-2007» [3] и лабораторного эксперимента «Сочи-2013» [4]). Однако в ходе таких экспериментов нет возможности установить достаточное число датчиков на длину волны, чтобы детально исследовать распределение волновой энергии по волновым числам.

Чтобы восполнить недостатки натурных наблюдений, был выполнен численный эксперимент с помощью гидродинамической фазоразрешающей модели SWASH [5]. В ходе эксперимента было воспроизведено распространение изначально монохроматических волн с периодом 7 с и высотой 1 м над дном постоянной глубины,

равной 4 м. Пространственное разрешение составило 0.4 м, длина расчетной области – 2000 м, длина серии – 3000 с, временная дискретность – 0.1 с.

В частотном спектре, полученном по данным моделирования (рис. 2), существует полный резонанс между основной и второй кратной волновыми гармониками ( $f_2 = 0.286\text{с}^{-1} = 2f_1$ ), тогда как в спектре волновых чисел наблюдается два пика, соответствующие второй гармонике: один пик соответствует удвоенному волновому числу основной гармоники (связанные волны), а второй – волновому числу, соответствующему удвоенной частоте пика спектра (свободные волны) (рис. 3). Разница между ними составляет  $0.01\text{ м}^{-1}$ , что соответствует длине наблюдаемого пространственного периода обмена энергией между гармониками в 100 м (рис. 2).

Наличие свободных и связанных волн объясняет наличие модуляции амплитуды второй гармоники по пространству.

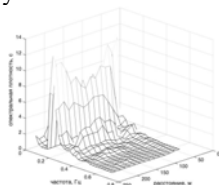


Рисунок 1. Пространственная эволюция частотного спектра волн, зарегистрированных в ходе полевого эксперимента «Шкорпиловцы-2007».

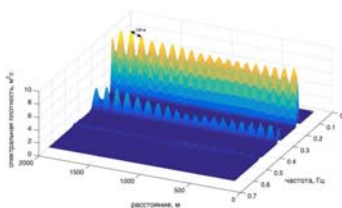


Рисунок 2. Пространственная эволюция частотного спектра волн, численный эксперимент в модели SWASH.

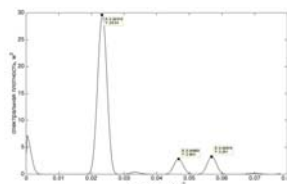


Рисунок 3. Распределение энергии по волновым числам, данные численного эксперимента в модели SWASH, время от начала эксперимента – 800 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-55-45026.

### Литература / References:

1. Young I.R., Eldeberky Y. Observations of triad coupling of finite depth wind waves // Coastal Eng. 1998. № 33. hh. 137–154. DOI 10.1016/S0378-3839(98)00006-4
2. Штремель М.Н. Особенности околорезонансных трехволновых взаимодействий в волнах на промежуточной глубине // Океанологические исследования. 2019. Т. 47 № 1. С. 138–144. DOI 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(1).43
3. Сапрыкина Я.В., Кузнецов С.Ю., Андреева Н., Штремель М.Н. Сценарии нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря // Океанол. 2013. Т. 53 № 4. С. 467–476. DOI 10.7868/S0030157413040126
4. Сапрыкина Я.В., Штремель М.Н., Кузнецов С.Ю. О возможности параметризации бифазы при трансформации волн в береговой зоне моря // Океанол. 2017. Т. 57. № 2. С. 284–296 DOI 10.7868/S0030157416060137
5. SWASH USER MANUAL <http://swash.sourceforge.net/download/zip/swashuse.pdf>



# СОЗДАНИЕ 3D-МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ФОТОГРАММЕТРИИ И НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

*И.П. Шумейко, С.А. Кузнецов, М.В. Собченко*

*Севастопольский государственный университет, Севастополь, ipshumejko@sevsu.ru, sakuznetsov@sevsu.ru, MVSobchenko@sevsu.ru.*

Актуальность изучения оползней обусловлена тем, что это природное явление способно нанести большой материальный ущерб, а сильные разрушения нередко приводят к человеческим жертвам [1]. В Крыму оползни встречаются в различных районах и имеют отличие по форме, масштабу проявлений, по углу схождения, толщине [2]. Учитывая опасность исследуемых явлений, для исследования оползневых явлений целесообразно использование современных аппаратных средств и информационных технологий, позволяющих выполнять дистанционные измерения и анализ исследуемых объектов. Таким образом для проведения таких исследований могут применяться методы трехмерного моделирования с использованием систем наземного лазерного сканирования и фотограмметрических методов.

В ходе проведения исследования было задействовано оборудование:

- наземный лазерный сканер (НЛС) Stonex X300 [3] для получения облаков точек оползневых поверхностей;
- GNSS-приемник Stonex S8 Plus для точного позиционирования и привязки облаков точек к географическим координатам;
- фотокамера Nikon D5300 для получения фотоснимков оползневых склонов;
- программное обеспечение StonexReconstructor, CloudCompare для обработки облаков точек и построения трехмерных моделей;
- программное обеспечение Agisoft Photoscan для обработки фотоснимков фотограмметрическим методом и последующего построения трехмерных моделей.

Для построения 3D-моделей оползневого склона применялись программные средства (StonexReconstructor, CloudCompare) для обработки облаков точек, полученных в результате наземного лазерного сканирования, а также фотограмметрический метод с использованием специализированного программного обеспечения (Agisoft Photoscan). Таким образом можно выделить следующие этапы проведения исследования:

## 1. Рекогносцировка местности

На этом этапе был выполнен предварительный осмотр исследуемого оползня (Учкуевский оползень [4]) и намечено 7 точек для выполнения лазерного сканирования и 5 точек для фотографирования объекта. Расположение точек выбиралось таким, чтобы можно было получить снимки оползневого склона с различных ракурсов.

## 2. Полевые работы

При проведении полевых работ для упрощения сшивки облаков точек было сделано 11 сканов оползневого склона в 9 точках при помощи НЛС:

- Скан 360° при качестве съемки «Быстрая» – 2 скана.
- Скан 200° при качестве съемки «Стандарт» – 1 скан.
- Скан 180° при качестве съемки «Стандарт» – 8 сканов.

При использовании GPS-приемника были зафиксированы координаты 9 точек. При помощи фотокамеры было сделано 73 фотографии оползневого склона.

## 3. Камеральная обработка

При проведении камеральных работ была выполнена сшивка и привязка облаков



точек, полученных при помощи НЛС, к географическим координатам. Также выполнено построение плотного облака точек, по фотоснимкам оползня. На основе полученных облаков точек были построены 3D-модели (mesh). В табл. 1 показаны результаты камеральных работ.

На рис. 1 изображена 3D-модель полученная в при помощи НЛС. Так же была рассчитана точность данной 3D-модели, которая находится в диапазоне 1.5–8.3 мм. На рис. 2 изображена 3D-модель, полученная при помощи фотограмметрии.

Таблица 1. Характеристики 3D-моделей, полученных в результате камеральной обработки.

Метод	Количество точек (облака точек)	Количество полигонов (полигональная модель)
НЛС	21126187	545178
Фотограмметрия	11605720	773714

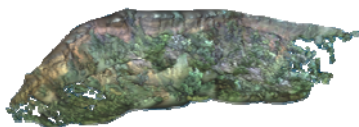


Рисунок 1. 3D-модель оползневого склона.



Рисунок 2. 3D-модель оползневого склона.

В результате затраты по времени используя метод НЛС составило 461.20 минут, а методом фотограмметрии 231 минут.

В результате выполнения исследований была опробована методика дистанционного изучения оползней с использованием технологий НЛС и фотограмметрических методов и были получены 3D-модели Учкеевского оползня и. В результате их анализа были определены обрушение блока пород по круглоцилиндрической поверхности скольжения, обрушение блока пород по одной поверхности скольжения, участки на которых возможны оползни.

#### Литература / References:

1. Демин А.М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
2. Ерыш И.Ф., Саломатин В.Н. Оползни Крыма. Часть I, II. Симферополь: Изд-во «Апостроф», 1999. 422 с.
3. X300 Laser Scanner – Stonex. <https://www.stonex.it/project/x300-laser-scanner/>
4. Горячкин Ю.Н., Федоров А.П. Оползни Севастопольского региона. Часть 1. Северная сторона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 1. С. 4–12.



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

*С.Е. Якуш, А.М. Полищук, А.Н. Галыбин*

*Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН, Москва, yakush@ipmnet.ru, alexanderpol@yandex.ru*

Добыча трудноизвлекаемых запасов углеводородов на месторождениях Баженовской свиты, при огромном потенциале запасов, сталкивается со значительными трудностями, обусловленными особенностями геологического строения пластов, большой глубиной залегания, физико-химическим состоянием углеводородного сырья.



В работах [1, 2] подробно рассмотрены причины, по которым технологии нефтедобычи, с успехом применяемые на других месторождениях, в том числе, обеспечившие «сланцевую революцию» в США, оказываются неэффективными для месторождений Баженовской свиты. В первую очередь это связано с тем, что большая часть органики находится в виде твердого породообразующего минерала (керогена) и нативной (легкой нефти), содержащихся в матрице в закрытых порах, не связанных между собой гидродинамически. В таких пластах, толщина которых может составлять порядка десятка метров, имеются отдельные высокопроницаемые пропластки с хорошими коллекторскими свойствами, однако толщина таких пропластков невелика (не более 10 процентов от общей толщины пласта). Очевидно, что разработка лишь высокопроницаемых пропластков традиционными методами не может считаться эффективной, поскольку основная часть запасов керогена оказывается не вовлеченной в процесс нефтедобычи. В то же время, такие технологии, как гидроразрыв пласта, оказываются неэффективными, обеспечивая добычу только нативной нефти, но не позволяя добыть углеводороды, содержащиеся в керогене.

Как показали расчеты [3], при закачке в высокопроницаемые пропластки окисляющего агента (воздуха) в типичных условиях Баженовской свиты удастся инициировать процесс внутрипластового горения и достигнуть прогрева пласта до температур выше  $350^{\circ}\text{C}$ , при которых начинается термическое преобразование керогена в порах. Рост давления в порах при достижении достаточного уровня приводит к возникновению трещиноватости, а слияние трещин обуславливает их гидродинамическую связанность, создавая пути фильтрации синтетической нефти и газа. Однако при закачке воздуха в горизонтальный высокопроницаемый пропласток образующиеся трещины расположены преимущественно вертикально, и синтетическая нефть может выходить в это пропласток не перед фронтом внутрипластового горения, а позади него, сгорая при контакте с поступающим кислородом. Поэтому необходимо разрабатывать новые технологические схемы, позволяющие организовать оптимальным образом пути фильтрации кислорода и синтетической нефти. Одна из таких схем предложена в [1, 2], она основана на бурении в верхней части пласта горизонтальной тупиковой скважины, создании в керогенсодержащем пропластке системы вертикальных трещин методами МГРП и закачке кислорода в эти трещины, минуя нефтенасыщенный высокопроницаемый пропласток.

Ключевое значение в создании связанной системы фильтрационных трещин имеет возможность прогрева пласта до температур, при которых внутрипоровое давление оказывается достаточным для разрушения породы. Поскольку процессы горения в трещинах ГРП, пиролиза, образования техногенной трещиноватости и фильтрации флюидов взаимосвязаны, а возникновение системы трещин носит пороговый характер, имеется необходимость развития соответствующих математических моделей.

В настоящей работе расчеты проводились на основе связанной композиционной модели фильтрации с учетом фазовых переходов и горения, а также геомеханической модели. Подробное изложение используемых уравнений и их численной реализации дано в работе [3]. Композиционная модель представляет собой совокупность законов сохранения вещества для многокомпонентных флюидов (вода, нефть, газ), причем молярные доли каждого компонента в разных фазах связаны между собой константами равновесия. Фильтрация описывается законом Дарси с соответствующими фазовыми проницаемостями, горение – кинетической схемой, основанной на литературных данных. Геомеханический блок описывает критические условия разрушения породы за счет роста внутрипорового давления с образованием связанной системы трещин.

В настоящей работе проведены одномерные расчеты процессов, протекающих по

толщине керогенсодержащего пласта при организации процесса согласно предложенной в [1, 2] схеме. Рассматривается закачка воздуха в трещины гидроразрыва, при этом считается, что изначально трещины насыщены нефтью и содержат определенное количество керогена, что позволяет инициировать горение в трещинах. Учитывается, что выделяющееся тепло идет на прогрев материала керогенсодержащей матрицы, а не только материала и флюидов в самих трещинах. В изначально непроницаемых блоках по температурным полям отслеживается зависимость температуры материала от времени, определяется доля преобразованного к данному моменту керогена в порах, внутрипоровое давление и состав образовавшихся при пиролизе продуктов. Считается, что разрушение породы произошло в расчетных ячейках, где внутрипоровое давление в какой-то момент превышает минимальное сжимающее напряжение 42 МПа, оцениваемое из горного давления 60 МПа и коэффициента распора 0.7.

Поскольку преимущественным направлением развития трещин является вертикальное направление (направление наибольшего сжатия), задача рассматривается в одномерной постановке (все переменные зависят только от координаты  $z$ ). Начало координат расположено на верхней границе керогенсодержащей матрицы, через которую осуществляется закачка воздуха, ось  $z$  направлена вертикально вниз. На верхней и нижней границах пласта толщиной 10 м поддерживаются постоянные заданные давления 260 и 250 бар, разность которых (10 бар) обеспечивает фильтрацию флюидов вертикально вниз. Проницаемость системы трещин ГРП принималась равной 10 мД, доля объема матрицы, занятой трещинами 5%, содержание керогена в трещинах 1%, нефтенасыщенность трещин 75%, удельная теплоемкость пород 0.8 кДж/кг К, плотность 2500 кг/м<sup>3</sup>. На рис. 1 показаны вертикальные распределения температуры и порового давления в матрице в различные моменты времени, соответственно. На рис. 1, б штриховой линией показан уровень давления разрушения породы 420 бар.

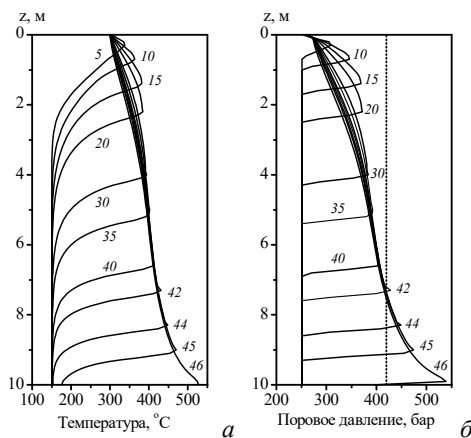


Рисунок 1. Прогрев керогенсодержащей матрицы при вертикальной закачке воздуха в трещины ГРП: а) температура в матрице, б) поровое давление в матрице.

Из рис. 1 видно, что температура породы повышается по мере продвижения фронта реакции от верхней границы пласта к нижней, соответствующей проницаемому пропластку. При данных параметрах задачи давление в порах достигает критического значения только ближе к нижней границе. Впервые разрушение породы начинается на расстоянии 7.25 метров от верхней границы в момент времени 42 суток. После полного

прохождения фронтом толщины матрицы, разрушенной оказывается вся область от 7.25 до 10 м, то есть охваченной техногенной трещиноватостью оказывается 27.5% толщины матрицы.

Приведенный пример расчета свидетельствует о том, что предложенная в [1, 2] альтернативная схема организации закачки окислителя в пласт потенциально реализуема. В представленном варианте расчета показано, что экзотермические реакции окисления, протекающие в трещине гидроразрыва, способны нагреть породу керогенсодержащей матрицы до температур, необходимых для пиролиза керогена в порах и создания в них достаточного внутреннего давления, приводящего в разрушению породы. Для более обоснованных выводов о применимости данного метода и его экономической эффективности необходимо проведение детальных численных расчетов процесса преобразования керогена, образования техногенной трещиноватости, фильтрации синтетической нефти и добычи углеводородов из высокопроницаемого пропластка. Такие расчеты должны быть проведены с вариацией параметров закачки, свойств пласта и характеристик трещин гидроразрыва.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 «Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России», а также частично – по теме государственного задания АААА-А20-120011690135-5.*

#### **Литература / References:**

1. Polishchuk A.M., Vlasov S.A., Yakush S.E. Current status of oil recovery from Bazhenov formation: Efficiency analysis of existing technologies and new approach // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proc. in Earth and Envir. Sci. 2018. pp. 395–410.
2. Якуш С.Е., Полищук А.М. Разработка Баженовской свиты: проблемы и подходы // Процессы в геосредах. 2019. № 4 (22). С. 540–551.
3. Yakush S.E., Galybin A.N., Polishchuk A.M., Vlasov S.A. Modeling of thermal gas treatment of low-permeability reservoirs of Bazhenov formation // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proc. in Earth and Envir. Sci. 2018. pp. 380–394.



## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА БИОХИМИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ ВО ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ**

**Д.С. Гладских<sup>1, 2, 3</sup>, Е.В. Мортиков<sup>2, 3, 4</sup>, В.М. Степаненко<sup>2, 3</sup>**

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, [daria.gladskikh@gmail.com](mailto:daria.gladskikh@gmail.com)

<sup>2</sup> Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

<sup>3</sup> Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва

<sup>4</sup> Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

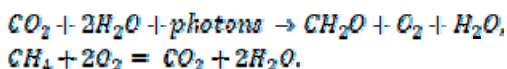
Внутренние водоемы, под которыми мы понимаем крупные озера и водохранилища, оказывают сильнейшее влияние на климат и его изменения, и во многом это влияние определяется биохимическими примесями, среди которых особую роль играют растворенные газы, в частности, парниковые: метан и углекислый газ [1]. Эти газы образуются при разложении мёртвых органических остатков: углекислый газ – в аэробных условиях, метан – в анаэробных (при очень малом содержании кислорода), и вносят вклад в создание парникового эффекта. С ростом содержания парниковых газов изменяются химические процессы в атмосфере, что может привести к ухудшению экологической ситуации. Помимо этого, биохимические процессы, протекающие в

водоемах, оказывают влияние и на качество воды. Сине-зеленые водоросли, или цианобактерии, являются источником углекислого газа, и их цветение существенно ухудшает экологическое состояние водных объектов. Таким образом, численное моделирование биохимических процессов во внутренних водоемах, с одной стороны, позволит как дать корректную оценку выбросов парниковых газов, а с другой - поможет более эффективно осуществлять прогноз качества воды.

В рамках настоящего исследования был разработан и реализован блок расчета биохимических характеристик озера в рамках трехмерной гидростатической модели водоема. Используемая трехмерная модель разрабатывается в НИВЦ МГУ на основе единого гидродинамического кода, объединяющего как RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), так и DNS- (Direct Numerical Simulation), LES- (Large-Eddy Simulation) подходы для расчета геофизических турбулентных течений при высоком пространственном и временном разрешении (см., например, [2-4]). Модель была дополнена уравнениями для расчета биохимических веществ по аналогии с одномерными уравнениями биохимии, используемыми в одномерной модели LAKE [5]. Уравнения описывают перенос, диффузию и реакции для таких веществ как: метан (CH<sub>4</sub>), кислород (O<sub>2</sub>), углекислый газ (CO<sub>2</sub>), азот (N), аргон (Ar), живые и отмершие частицы фито- и зоопланктона и так далее, и имеют вид:

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial x_i C_{ij}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (K_b + \chi_b) \frac{\partial C_{ij}}{\partial x_i} + R(\cdot),$$

где  $C_{ij}$  – концентрации веществ,  $K_b$  и  $\chi_b$  – коэффициенты турбулентной и молекулярной диффузии соответственно, а член  $R(\cdot)$  описывает реакции. Основными и рассматриваемыми в первую очередь на данном этапе реакциями являются фотосинтез и окисление метана:



С применением разработанного блока биохимии был проведен численный эксперимент, аналогичный численной реализации лабораторного эксперимента Като-Филлипса [6], в котором рассматривается однородная стратифицированная жидкость достаточно большой глубины, вертикальные границы отсутствуют, начальный профиль температуры является линейным, а единственным источником турбулентности считается ветер с постоянной скоростью. Подобный численный эксперимент для трехмерной и одномерной моделей без учета биохимии был описан авторами в работе [4]. В настоящем исследовании эксперимент был дополнен граничными условиями для таких веществ, как кислород и метан. Поток метана на дне задан постоянным:  $f_{C_{CH_4} \text{ dno}} = -3 \cdot 10^{-7}$ , концентрация кислорода на дне – нулевая:  $C_{O_2 \text{ dno}} = 0$ . Потоки в атмосферу заданы через коэффициент газообмена, рассчитываемый по так называемой «модели обновления поверхности» [7, 8], в которой учитывается скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, которая явно считается в k-ε-замыкании, используемом как в трехмерной, так и в одномерной моделях водоема.

На рис. 1 представлены рассчитанные трехмерной и одномерной моделями профили концентраций метана (рис. 1, а) и кислорода (рис. 1, б) к концу первых суток.

Следует отметить, что наиболее важной характеристикой при исследовании метана является поток этого газа в атмосферу, поскольку увеличение содержания метана в атмосфере способствует усилению парникового эффекта [9], так как метан интенсивно поглощает тепловое излучение Земли. Вклад метана в создание парникового эффекта составляет примерно 30% от величины, принятой для углекислого газа [10]. Временной ряд значений потока метана в атмосферу, полученных с использованием трехмерной модели, представлен на рис. 2.



Рисунок 1. Вертикальные профили концентраций метана (а) и кислорода (б) к концу первых суток, рассчитанные с помощью трехмерной и одномерной моделей.

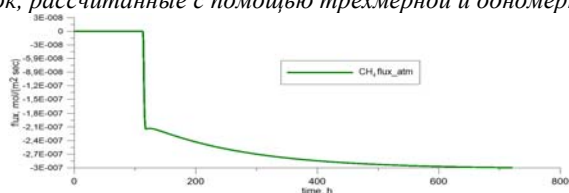


Рисунок 2. Временной ряд значений потока метана в атмосферу, рассчитанных с применением трехмерной модели.

В дальнейшем авторами планируется применение трехмерной модели с блоком расчета биохимии для моделирования концентрации примесей (в частности, парниковых газов) в реальных озерах и водохранилищах, что позволит оценивать как изменения биогеохимического режима самих водоемов, так и влияние этих изменений на глобальный и региональный климат.

*Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ для молодых ученых (МК-1867.2020.5, МД-1850.2020.5) и РФФИ (18-05-00292, 20-05-00776).*

#### Литература / References:

1. Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Knoll L.B., Kutser T. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54. pp. 2298–2314.
2. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // *Izv. Atm. Ocean. Phys.* 2016. V. 52. pp. 108–115.
3. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russ. J. Numer. Analysis Math. Model.* 2019. V. 34 (2). pp. 1–14.
4. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.В. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего смешанного слоя // *Водн. Рес.* 2019. 18 стр. (в печати)
5. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., and Timo V. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9(5). pp. 1977–2006.
6. Kato H., Phillips O.M. On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid // *J. Fluid Mech.* 1969. V. 37 (4). pp. 643.
7. MacIntyre S., Jonsson A., Jansson M., Aberg J., Turney D.E., Miller S.D. Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37(24).
8. Heiskanen J.J., Mammarella I., Naapanala S., Pumpanen J., Vesala T., MacIntyre S., Ojala A. Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake // *Tellus* . 2014. V. 66 (May).
9. Zeli T., Qianlai Zh. Arctic lakes are continuous methane sources to the atmosphere under warming conditions // *Envir. Res. Lett.* 2015b. V. 10 (5). pp. 054016.
10. Коротеев М.П., УльбаевТ.С., Артамонова И.М. Роль метана в парниковом эффекте // *Природообустройство.* 2009. № 1. С. 44–49.



## СЕДИМЕНТАЦИЯ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

*И.М. Кабатченко*<sup>1,3,4</sup>, *А.Л. Бреховских*<sup>1,2</sup>, *М.С. Клюев*<sup>2</sup>, *Е.А. Коршенко*<sup>1</sup>,  
*М.В. Резников*<sup>1</sup>, *В.В. Фолин*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова, Москва,  
wavelab1@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П.Ширинова, Москва

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт, Москва

<sup>4</sup> Российский Университет Транспорта, Москва

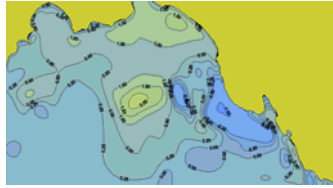
Предложена модель распространения и седиментации морской взвеси. Модель численно реализована для северо-восточного района Черного моря. По модельным расчетам установлена высокая пространственная изменчивость аккумуляции донных илов. Выявлено две (на Керченско-Таманском шельфе и в центральной части района) зоны с высоким (до 2 кг/м<sup>2</sup> в год) уровнем седиментации. Уравнение изменения массовой концентрации взвешенных наносов (МКВН) в сигма координатной системе имеет вид:

$$\frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C(\omega + \omega_c)}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_c}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ DA_c \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ DA_c \frac{\partial C}{\partial y} \right], \quad (1)$$

где  $x, y, \sigma, t$  – координатная система,  $U, V$  – горизонтальные компоненты скорости течения,  $\omega$  – вертикальная составляющая скорости, нормальная к сигма-поверхности,  $\omega_c$  – гидравлическая крупность (скорость седиментации в спокойной воде),  $K_c$  – вертикальный коэффициент турбулентной диффузии,  $A_c$  – горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии,  $D$  – глубина.

Вертикальный коэффициент турбулентной диффузии в (1) учитывается в рамках  $k$ - $L$  модели.  $L$  – турбулентный масштаб длины,  $k = E/\rho$ ,  $E$  – кинетическая энергия турбулентности. Граничное условие у дна  $k_b$  учитывают касательное напряжение, вызванное течениями и волнами [1]. Для задания граничного условия ( $k_s$ ) на поверхности применен подход Китайгородского и его понятие “скорость трения снизу” [2].

Для решения уравнений второго порядка как (1) необходимо иметь два граничных условия. В нашем случае – на верхней и нижней границах. Граничные значения МКВН у дна вычисляем по формуле В.М. Маккаеева [3, 4]. Величины для расчета МКВН на поверхности моря извлекаем из архива данных OceanColor [5]. Это ежесуточные данные спутника Modis о отражательной способности в диапазонах Rrs (443,488,547) и температуре на поверхности моря (SST) с разрешением по горизонтали 1 км. Далее по алгоритму из [6] получаем МКВН на поверхности моря с тем же пространственно-временным разрешением (1 км и 1 день). Модель распространения взвешенных частиц численно реализована для северо-восточного района Черного моря. Шаг сетки в области моделирования 500×500 м (574×186 точек). По результатам модельных расчетов за 2016 год построена карта годовых размывов и намывов дна северо-восточной части Черного моря (рис. 1). Величина намывов ( $h$ ) в современный период усредненная по акватории для Черного моря составляет порядка  $h=0,2$  м за тысячелетие. Эта величина связана со скоростью намыва массы на единицу площади  $\mu$  (скорость намыва) очевидной формулой  $\mu = h [k \rho_m + (1 - k) \rho_e]$ , где  $\rho_m$  – плотность твердого осадочного вещества,  $\rho_e$  – плотность морской воды,  $k$  – коэффициент упаковки твердых частиц в донных отложениях. В частности, при  $k = 1$  и  $\rho_m = 3\,000$  кг/м<sup>3</sup> получаем  $\mu = 0.6$  кг/м<sup>2</sup>, что качественно и по порядку величины хорошо совпадает с расчетными полями намывов и размывов представленными на рис. 1.



*Рисунок 1. Карта годовых намывов и размывов илов (кг/м<sup>2</sup>) за 2016 г. в северо-восточной части Черного моря.*

#### **Литература / References:**

1. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
2. Китайгородский С.А. Аэродинамическая шероховатость морской поверхности сверху и снизу. М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология», 2002. 16 с.
3. Маккавеев В.М. К динамике твердого и жидкого стока свободных потоков при прямолинейном и извилистом руслах // Тр. по гидрол. 1938. Вып. I. Изд. ГЭНИИ. С. 5–81.
4. Маккавеев В.М., Коновалов И.М. Гидравлика. Л.: Речиздат, 1940. 643 с.
5. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
6. Кременчуцкий Д.А., Кубряков А.А., Завьялов П.О., Коновалов Б.В., Станичный С.В., Алескерова А.А. Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS // Экол. Безоп. Прибр. и Шельф. Зон Моря. 2014. Т. 29. С. 5–9.



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
Preface .....	7
Baklagin V.N. Many-year variability of the lakes Ladoga and Onego ice regime based on remote sensing and in situ data .....	9
Barenbaum A.A. Theory of modern oil and gas formation .....	14
Belyakov G.V., Tairova A.A., Iudochkin N.A. Formation and propagation of a hydraulic fracture. Physical experiment .....	17
Dubinya N.V. Fluid conductivity of natural shear fractures in vicinity of a production well during directional unloading .....	19
Fedyushkin A.I. The movement of the particles around cylindrical particle in a shear flow .....	21
Filatov N.N. The ecological-socio-economic system of water body-watershed: modeling of optimal control .....	17
Galybin A.N. 3D stress field reconstruction in a heavy elastic stratum based on the discrete data on stress orientations .....	23
Kistovich A.V. Hydrodynamic potentials in 3-D space .....	25
Kochergin V.S., Kochergin S.V. Variational identification of parameters of the transport model in the Sea of Azov based on remote sensing data .....	27
Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of stably stratified turbulent plane Couette flow .....	30
Nachev V.A., Dubinya N.V. On the possibility of experimental study of nonlinear rheological properties of bottom soils .....	32
Orlova N.S. Comparison of two approaches to describing of falling rocks .....	35
Rozhkov A.N., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Breakup of a drop on collision with an obstacle ...	36
Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Kuznetsov I.D., Verkhoturov D.A., Dyakonova A.D. Gradient morphology in the localization of objects in images .....	38
Terentiev E.N., Shilin-Terentyev N.E., Terentyev A.E. Setting up a math microscope for an event horizon telescope .....	41
Terentiev E.N., Shilin-Terentyev N.E., Terentyev A.E. Star clusters, tubes of stellar currents and jet spittings near the Powehi black hole .....	43
Tkachenko E.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V. The influence of external parameters on the evening transition in atmospheric boundary layer .....	45
Voronina N.N. Retracking skewness of the sea surface elevations from altimeter return waveforms .	48
Аникин Л.П., Жильцова А.А., Лунина О.Н., Пацаева С.В., Рашидов В.А. Изучение фототрофных микроорганизмов в наскальных заплесковых ваннах острова Атласова (вулкан Алайд, Курильская Островная Дуга) .....	50
Афанасьев В.В. Берега контактных зон Северной Пацифики .....	52
Багатинская В.В., Багатинский В.А., Лебедев С.А., Дианский Н.А. Сравнительный анализ средней динамической топографии океана, построенной различными моделями .....	54
Барков С.О. Исследования свойств пластов-коллекторов подземных хранилищ газа и процессов при их эксплуатации .....	55
Батухтин И.В., Беседина А.Н., Горбунова Э.М., Петухова С.М. Исследование динамического деформирования флюидонасыщенных коллекторов по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга на территории геофизической обсерватории «Михнево» .....	57
Блохина Н.С. Пространственно-временная изменчивость местоположения термобара по акватории водоёма при различных метеорологических условиях .....	60
Борисов В.Е., Иванов А.И., Критский Б.В., Савенков Е.Б., Зипунова Е.В. Математическое моделирование динамики трещины грт в пороупругой среде в рамках трехмерной самосогласованной постановки .....	61
Букатов А.А., Соловей Н.М., Павленко Е.А. Фазовые характеристики и вертикальная структура свободных внутренних волн в морях русской Арктики .....	64



Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Внутренние гравитационные волны от движущегося на поверхности стратифицированной среды нелокального источника возмущений.....	65
Бурдюгов В.М. Изменя шероховатости морской в зонах слик-рябь .....	67
Гладских Д.С., Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Троицкая Ю.И. Математическое моделирование термического режима внутренних водоемов с использованием объединенных моделей WRF и LAKE.....	69
Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А. Анализ динамических и энергетических характеристик циркуляции вод у берегов западного Крыма и г. Севастополь на основе усвоения данных наблюдений гидрологических съемок 2007-2009 гг. в численной модели динамики .....	72
Дорошенко И.А., Знаменская И.А., Коротеев Д.А. Источники больших данных в лабораторных и геофизических исследованиях .....	74
Дугаров Г.А., Фокин М.И., Дучков А.А. Температурная зависимость скоростей и поглощения продольных волн в гидратосодержащих угольных образцах .....	76
Елкин Д.Н., Зацепин А.Г. Лабораторное исследование влияния шероховатости и рельефа дна на вдольбереговое даунвеллинговое течение и сравнение закономерностей .....	78
Епифанов В.П. Влияние структуры льда на его механические и прочностные свойства .....	81
Жидкова А.Ю. Информационно-измерительная система комплексной геоэкологической оценки степени эвтрофирования мелководного водоема .....	84
Запевалов А.С. Шероховатость морской поверхности, формируемая волнами разных масштабов .....	88
Запевалов Е.Г. Моделирование качки судна на нерегулярном волнении .....	89
Захаров В.М., Перов С.П., Уйбо В.И., Крученицкий Г.М., Показеев К.В., Ивлев Л.С., Челибанов В.П., Чукова Ю.П., Сидоренков Н.С., Борог В.В., Цетлин В.В., Каверин В.Г. Геоинжиниринг: достижения и проблемы .....	92
Захарова Е.В., Фомин В.В., Дианский Н.А., Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г. Влияние комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений на гидротермодинамические характеристики Невской губы в период сильного штормового нагона 1-2 октября 2019 г. ....	94
Зацепин А.Г., Островский А.Г., Волков С.В., Кочетов О.Ю., Швоев Д.А. Автоматизированная станции для оперативного мониторинга Северного Ледовитого Океана .....	97
Зырянов В.Н., Егорова В.М. Топографические вихри над неосесимметричным возмущением рельефа дна .....	97
Иванова И.Н., Будников А.А., Малахова Т.В., Мурашова А.И. Комплексные измерения гидрологических параметров и оценка суммарного потока газовой разгрузки в области мелководных сипов вблизи мыса Фиолент .....	100
Калининченко В.А. Влияние плавающей тонкой пластины на стоячие поверхностные волны в прямоугольном сосуде .....	103
Карев В.И. Геомеханический подход к разработке ТриЗ .....	105
Касьянов С.Ю. Влияние тепловыделения из энергонесущих мантийных вихрей на потепление в Арктической зоне – гипотеза .....	108
Касьянов С.Ю. О качественной диагностической модели движения вещества под Гималайско-Тянь-Шаньским горным кольцом.....	111
Килесо А.В., Лобчук О.И. Численное моделирование переноса антропогенного мусора в прибрежной зоне Калининградской области.....	114
Кистович А.В., Чаплина Т.О., Степанова Е.В. Аналитическое представление контактной зоны пятна углеводородов на водной поверхности .....	115
Клюев М.С., Шрейдер А.А., Зверев А.С., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Вольтер Е.Р., Сажнева А.Э. О принципах сейсмоакустического обнаружения палеоструктур морского дна в прибрежной зоне (на примере Голубой бухты) .....	118
Клюев М.С., Шрейдер А.А., Зверев А.С., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Вольтер Е.Р., Сажнева А.Э. О палеопритоке палеоруслу реки Ашамба в Голубой бухте по данным широкополосного сейсмоакустического профилирования .....	122

Коваленко Ю.Ф. Геомеханический анализ пескопроявлений при эксплуатации подземных хранилищ газа.....	126
Косых Н.Б. Комплексные акустические исследования как один из основных способов разгадки феномена «поющих» пещер античных городов Крыма.....	129
Кузнецов С., Волвакиер С., Сапрыкина Я., Коттепад С. Нелинейные особенности трансформации спектра штормовых волн над грязевыми банками.....	131
Кузнецова А.М., Поплавский Е.И., Русаков Н.С., Троицкая Ю.И. Моделирование ветрового волнения в условиях полярной депрессии в рамках модели WAVEWATCH III.....	132
Кумакшев С.А. Моделирование системы нестационарных океанских волн по фотоснимку с МКС.....	135
Куприянова А.Е., Гриценко В.А. Численное моделирование взаимодействия пятен соленой воды, распространяющихся по склону дна.....	137
Куприянова А.Е., Михневич Г.С. Виртуальная скважина как инструмент моделирования вертикальной геологической структуры.....	138
Лебедев Н.Е., Сизов А.А., Банкина Т.М. Исследование положения верхней границы сезонного термоклина в зависимости от скорости основного черноморского течения (по данным дрейферного эксперимента).....	140
Лукманов Р.А., Русаков В.Ю., Кузьмина Т.Г., Борисов А.П. Фациально-генетические условия осадконакопления и литолого-геохимические особенности плейстоцен-голоценовых отложений акватории Карского моря.....	143
Люшвин П.В., Буянова М.О. Сток CH <sub>4</sub> и СО из стратосферы, дыры О <sub>3</sub> и ультрафиолетовые пожары.....	145
Максимочкин В.И. Геомагнитное поле в голоцене по лавовым породам вулканов Авачинский и Толбачик.....	147
Мальцев А.А., Щербаков Г.Ю. Методика уточнения модели кислотной обработки скважины на основе воспроизведения керновых исследований.....	149
Малюков В.П., Шепилов А.А. Инновационные технологии строительства горизонтальных и двухъярусных подземных резервуаров в каменной соли.....	152
Малюков В.П. Отрывные течения при гидродинамическом воздействии раствора на каменную соль.....	154
Маркова Н.В., Демьшев С.Г., Нечаев С.С., Шокуров М.В. Реакция глубоководных течений Черного моря на экстремальное атмосферное воздействие.....	156
Мортиков Е.В., Оноприенко В.А., Дебольский А.В., Глазунов А.В., Яковлев Н.Г. О параметризации вертикального турбулентного перемешивания в верхнем слое океана.....	158
Назарова Л.А., Голиков Н.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В. Исследование анизотропной проницаемости геоматериалов по данным фильтрационных испытаний цилиндрических образцов с центральным отверстием.....	160
Наумов И.В. Самоорганизующиеся вихревые структуры в замкнутых реакторах: формирование, управление и диагностика.....	163
Никонова Е.Э., Ширшин Е.А., Фадеев В.В. Определение квантового выхода флуоресценции фитопланктона по спутниковым данным – на примере польней моря Амундсена.....	165
Новикова Е.В., Тримонова М.А. Эффект обратного напряжения при расчете минимального главного напряжения по данным лабораторных экспериментов по гидроразрыву пласта.....	168
Носов В.Н., Каледин С.Б., Иванов С.Г., Зевакин Е.А., Серебриников Л.В. Авиационный сканирующий лазерный локатор для регистрации характеристик морского волнения.....	169
Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Устинов К.Б., Зайцев А.В., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И., Шевцов Н.И. Эффект Кайзера при двух- и трехосном непропорциональном сжатии песчаника с последовательным вращением эллипсоида Ламе.....	171
Пахненко В.П. Применение методов векторной графики для изучения распространения углеводородов по водной поверхности.....	175
Перегудин С.И., Перегудина Э.С., Холодова С.Е. Об устойчивости динамических процессов в геосредах.....	176
Перов С.П., Показеев К.В., Сидоренков Н.С. О чем предупреждают факторы глобальных изменений.....	178

Перов С.П., Перов А.С., Сидоренко Н.С. Космическая погода, приливы в гелио- геосферах и вирусные заболевания.....	181
Пинчук В.С., Чубаренко Б.В., Есюкова Е.Е. Загрязнение побережья Светлогорской бухты остатками геосинтетических материалов и его связь с метеорологическими факторами...	184
Полников В.Г., Цюо Ф. Турбулентность, индуцированная ветровыми волнами.....	186
Пономарёв Н.А., Юшков В.П., Еланский Н.Ф., Захаров В.И. Анализ загрязнения воздушного бассейна Москвы на основе сопоставления результатов расчетов химико-транспортной модели SILAM с данными наблюдений.....	188
Руденко Ю.К., Плаксина Ю.Ю., Винниченко Н.А., Пуштаев А.В., Уваров А.В. Особенности взаимодействия всплывающей конвективной струи с поверхностью жидкости.....	189
Русаков В.Ю., Талденкова Е.Е., Борисов А.П., Кузьмина Т.Г., Ромашова Т.В., Соловьева Г.Ю., Лукманов Р.А. Реконструкция истории седиментации восточного побережья Новой Земли за последние 11.3 календарных тыс. лет (по данным изучения донных осадков заливов Ога и Цивольки).....	192
Рябова С.А. Геофизические эффекты вулканической активности Синабунга (Индонезия) в августе 2020 г.....	195
Рябова С.А. Исследование вариаций параметров электрического поля в период сильных магнитных бурь в 2018 г.....	196
Рябова С.А., Спивак А.А., Рыбнов Ю.С. Изменение временных вариаций акустических колебаний в приземном слое атмосферы в г. Москве во время ограничения производственной активности, обусловленного карантинными мерами по COVID-19 в 2020 г.....	197
Сапрыкина Я.В. Частотная избирательность диссипации энергии волн при их распространении над подводным валом .....	198
Сергеев Д.А., Вдовин М.И., Троицкая Ю.И. Лабораторное моделирование процессов обмена импульсом и теплом между атмосферой и океаном.....	199
Сидорин Ю.В., Чаплина Т.О. Исследование прочностных свойств породы коллектора нефтегазового месторождения на установке истинно трехосного нагружения.....	202
Соболева Е.Б. Подземные концентрационно-конвективные течения, обусловленные испарением грунтовых вод с поверхности земли.....	205
Соколов В.А. Результаты применения теории неравновесных диссипативных термодинамических систем в океанографии .....	207
Соколов В.А. Особенности природной статистики морских термохалинных полей, противоречащие существующим методам расчётов этих полей .....	208
Соколов В.А., Показеев К.В. Критерии качества расчётов морских гидрологических полей... 209	209
Соловьев Д.А., Нефедова Л.В. Нейронное прогнозирование аномалии осредненной температуры воздуха для арктического региона.....	210
Тимонин В.И., Носов В.Н., Варганов Н.В., Косакян Н.К. Оптимизация детектирования признаков аномалий на снимках морской поверхности корреляционными методами, основанная на использовании моделей геометрии аномалий .....	214
Устинов К.Б. Моделирование геомеханических процессов при разработке нефтегазовых месторождений. основные задачи и подходы к их решению .....	218
Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. Картирование карстовых пещер резонансным методом .....	220
Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. Диагностика технического состояния крепления верховых откосов плотины ГЭС по стоячим волнам .....	222
Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Гидродинамика капли воды при её столкновении с небольшим препятствием .....	225
Фетисов С.В., Чубаренко И.П. Подготовка данных для создания модели искусственной нейронной сети, прогнозирующей значительные выбросы антропогенного морского мусора на побережье Самбийского полуострова (Балтийское море).....	227
Химуля В.В. Моделирование процессов деформирования и фильтрации при использовании метода направленной разгрузки пласта на скважинах, пробуренных на ачимовские отложения .....	229

Холопцев А.В. Многолетние изменения уровня черного моря по данным фактических наблюдений и результатам реанализа GLORYS12V.1.....	230
Холопцев А.В., Подпорин С.А. Изменения уровня Черного моря и объема ледяного покрова европейского сектора Арктики в XXI веке.....	233
Холопцев А.В., Подпорин С.А. Изменения средних значений уровня Черного моря для летнего сезона, а также характеристик воздухообмена Арктики с регионами умеренных широт.....	237
Цетлин В.В., Степанова Г.П., Сергеев О.В., Перов А.С. Геофизическое модулирование воздействия электромагнитных факторов на воду и водную среду живых организмов.....	241
Цыпкин Г.Г. Конверсия гидрата CH <sub>4</sub> в гидрат CO <sub>2</sub> в пластах при высоких скоростях инъекции углекислового газа.....	244
Чаплина Т.О., Степанова Е.В. Экспериментальное исследование геометрии и динамики переноса различных веществ в компактных составных вихрях.....	246
Чаплина Т.О., Степанова Е.В. Экспериментальные исследования затопленных струй.....	248
Чернов И.А., Толстикова А.В., Яковлев Н.Г. Численное моделирование биогеохимических процессов в белом море с учетом экосистемы морского льда.....	251
Чукова Ю.П. Открытая термодинамическая система планеты Земля и фундаментальный закон эффективности преобразования солнечной энергии.....	253
Шарафиев З.З., Павлов Д.В. Лабораторное исследование разрушения склона при импульсном динамическом воздействии.....	256
Шевцов Н.И. Физическое моделирование на установке ИСТНН деформационных процессов в коллекторах подземных хранилищ газа при их эксплуатации.....	258
Шрейдер А.А., Сажнева А.Э., Клюев М.С., Бреховских А.Л., Евсенко Е.И., Гринберг О.В. Эволюция дна в области сочленения Мадагаскара и Индии.....	260
Шрейдер А.А., Сажнева А.Э., Клюев М.С., Бреховских А.Л., Бохойо Ф., Галиндо-Зальдивар Х., Моралес Ц., Евсенко Е.И., Гринберг О.В. Геохронология и кинематика дна котловины Поуэлл на северо-западе моря Уэдделла.....	260
Штремель М.Н., Кузнецов С.Ю. Свободные и связанные волны в береговой зоне моря.....	261
Шумейко И.П., Кузнецов С.А., Собченко М.В. Создание 3D-модели поверхности оползневого склона с использованием метода фотограмметрии и наземного лазерного сканирования.....	263
Якуш С.Е., Полищук А.М., Галыбин А.Н. Численное моделирование термогазового воздействия на пласт Баженовской Свиты.....	264
Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. Численное моделирование переноса биохимических примесей во внутренних водоемах.....	267
Кабатченко И.М., Бреховских А.Л., Клюев М.С., Коршенко Е.А., Резников М.В., Фомин В.В. Седиментация взвешенных наносов в северо-восточной части черного моря.....	270



Научное издание

6-я Международная научная конференция-школа молодых ученых

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСРЕДАХ**

Сборник материалов

Москва, 21-23 октября 2020 г.

Напечатано с готового оригинал-макета. Подписано в печать 07.10.2020 г.

Формат 70x100 1/16. Усл.печ.л. 22,1. Тираж 100 экз. ИПМех РАН

Отпечатано в типографии «Alicegroup». Заказ № А644

105118, Россия, Москва, Семеновская набережная, д. 3/1, корп. 6, подъезд 1, оф. 1. Тел.: +7(999)869–23–77

[www.alicegroup.ru](http://www.alicegroup.ru)