



# ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2017 Том 45 № 1

Физика океана и  
климат

Биоокеанология

Морская геология,  
геофизика и  
геохимия

Морская техника и  
приборы

История и  
персоналии

Информация



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова

## ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2017 Том 45 № 1

Основан в 1959 г.  
Выходит 6 раз в год  
Print ISSN: 1564-2291 Online ISSN: 2587-9634

Главный редактор: **А.Г. Костяной**

Редакционная коллегия:

**А.И. Азовский, О.Р. Андерсон (O. R. Anderson, USA), Д.А. Астахов, С.И. Бадурин, С. Бланк (S. Blanc, Argentina), В.В. Вельтищев, А.В. Гебрук, С.К. Гулев, А.В. Дриц, А.В. Дубинин, П.О. Завьялов, Дж. Зодиатис (G. Zodiatis, Greece), Э. Кампос (E. Campos, Brazil), Л.И. Лобковский, А.Г. Матуль, Е.Г. Морозов, О.О. Моллер (O.O. Möller Jr., Brazil), С.Л. Никифоров, Г.В. Новиков, А.Г. Островский, Н.А. Римский-Корсаков, Б.Я. Розман, Н.О. Сорохтин, П.А. Стунжас, Р.Ю. Тараканов, Й. Тиде (Jö. Thiede, Germany), А.С. Ульянов, М.В. Флинт, В.П. Шевченко, Л. Шемер (L. Shemer, Israel)**

Ответственный редактор, заведующий редакцией  
**С.А. Свиридов**

Адрес редакции: 117997, Москва, Нахимовский пр., д. 36  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук,  
тел. +7 (495) 719-0035, e-mail: [jorboard@ocean.ru](mailto:jorboard@ocean.ru) официальный сайт: <https://www.jor.ocean.ru>

УДК 551.46

ББК 26.221

Научный журнал «Океанологические исследования» издается с 1959 года специальными тематическими выпусками и является известным печатным изданием в области океанологии. С 2017 года журнал издается в печатной и электронной сетевой версии и публикует оригинальные научные статьи по актуальным вопросам развития технологий для морских исследований, по результатам теоретических и экспериментальных исследований в области физической, химической, биологической и геологической океанологии, исследований морских экосистем, по изучению процессов в океане и атмосфере и их взаимодействию, в том числе, с использованием информационных технологий и спутникового мониторинга для решения фундаментальных и прикладных задач океанологии. Публикуемые в нем научные статьи, тематические обзоры и информация о конференциях, симпозиумах, экспедициях и других событиях представляют интерес для российского и международного океанологического научного сообщества: специалистов в области океанологии, гидрометеорологии, климатологии, географии, дистанционного зондирования Земли из космоса, морского приборостроения, разработки комплексных систем для морских исследований, мониторинга океана, моделирования природных и антропогенных систем и процессов. Журнал может быть полезен также преподавателям, аспирантам и студентам вузов соответствующего профиля. Членами Редколлегии журнала являются ведущие ученые России и международного научного сообщества в области океанологии.

«Океанологические исследования», Том 45, № 1, М.: ИО РАН, 2017. 260 с.  
Journal of Oceanological Research, Vol. 45, No. 1, Moscow: IO RAS, 2017, 260 p.

DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1)

The scientific Journal of Oceanological Research is published since 1959 by special thematic issues. Since 2017, the Journal is published in an electronic online version in the field of ocean sciences and publishes original scientific articles on topical issues of technology development for marine research, theoretical and experimental results in physical, chemical, biological and geological oceanology, marine ecosystem research, processes in the ocean and the atmosphere and their interaction, and obtained by different methods, in particular, using information technologies and satellite monitoring systems to solve the fundamental and applied problems of oceanography. The scientific articles, thematic reviews and information on conferences, symposiums, expeditions and other important events published in the Journal are of interest to international ocean scientific community.

This issue contains the original papers in Russian and abstracts in English on physical oceanography, marine biology, marine chemistry, geophysics, and R&D engineering.

**Москва**

Издательство: Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)

ISSN: 1564-2291

© ИО РАН, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Соков А.В.</b> Приветственное слово от издателя Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.....	5
<b>Морозов Е.Г.</b> История журнала «Океанологические исследования» .....	7

### Физика океана и климат

<b>Гинзбург А.И., Крек Е.В., Костяной А.Г., Соловьев Д.М.</b> Эволюция мезомасштабного антициклонического вихря и вихревых диполей/мультиполей на его основе в Юго-Восточной Балтике (спутниковая информация: май–июль 2015 г.) .....	10
<b>Кузнецов В.П.</b> К теории спектров нелинейных волн в диссипативных средах .....	23
<b>Лазарюк А.Ю., Каплуненко Д.Д., Островский А.Г., Лобанов В.Б., Трусенкова О.О., Ладыченко С.Ю.</b> Экспериментальные исследования изменчивости термохалинной структуры вод над континентальным склоном Северо-Западной части Японского моря .....	34
<b>Лебедев К.В.</b> Арго-модель исследования глобального океана: синтез наблюдений и численного моделирования .....	53
<b>Никитин О.П.</b> Международные программы глобальных океанографических наблюдений и участие в них России .....	70

### Биоокеанология

<b>Астахов Д.А., Савинкин О.В.</b> Находка большой клональной группы облигатно симбиотической актинии <i>Entactmaea quadricolor</i> без рыб-симбионтов – влияние условий среды .....	90
--	----

### Морская геология геофизика и геохимия

<b>Трубкин И.П., Немировская И.А.</b> Расчет пространственно-временных характеристик аварийного разлива судового топлива в прибрежной зоне Карского моря .....	99
<b>Подгорный К.А., Леонов А.В.</b> Моделирование процессов распространения взвешенного вещества в морских прибрежных акваториях: 1. Описание ВВ-модели .....	109

<i>Подгорный К.А., Леонов А.В.</i> Моделирование процессов распространения взвешенного вещества в морских прибрежных акваториях: 2. Тестирование и практическое применение ВВ-модели.....	142
--	-----

### **Морская техника и приборы**

<i>Носов А.В.</i> Особенности метода термокомпенсации для автономных регистраторов сигналов .....	163
<i>Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Флинт М.В.</i> Технические аспекты исследований окружающей среды Западной части Карского моря .....	170
<i>Римский-Корсаков Н.А.</i> Структура технологии гидролокационных исследований дна и подводных объектов .....	187

### **История и персоналии**

К 100-летию академика Леонида Максимовича Бреховских .....	196
<i>Воронович А.Г.</i> Воспоминания о Л.М. Бреховских.....	212
<i>Гончаров В.В., Веденёв А.И., Цыплакова Т.И.</i> Академик Л.М. Бреховских в Отделе акустики океана ИО РАН.....	216
<i>Гинзбург А.И., Зацепин А.Г.</i> К 90-летию Константина Николаевича Федорова .....	231
<i>Зацепин А.Г.</i> К 90-летию Григория Исааковича Баренблатта.....	240
<i>Морозов Е.Г.</i> К 100-летию Вальтера Манка (Walter Munk) .....	244
<i>Сагалевиц А.М.</i> К 40-летию ПОА «Пайсис» и 30-летию ГОА «Мир» .....	249

### **Информация**

<i>Бадулин С.И.</i> XXVI Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике .....	254
<i>Серебряный А.Н., Гончаров В.В., Островский А.Г.</i> XVI школа-семинар им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана» .....	255
<i>Свиридов С.А., Жмур В.В., Тараканов Р.Ю.</i> Войтовские чтения: I-я Международная конференция «Современные проблемы термогидромеханики океана» СПТО-2017 .....	258



**Journal of Oceanological Research,  
2017, Vol. 45 No 1**

**Contents**

*Sokov A.V.* Welcoming speech from the publisher  
Shirshov Institute of Oceanology, RAS .....5  
*Morozov E.G.* History of the Journal of Oceanological Research .....7

**Ocean physics and climate**

*Ginzburg A.I., Krek E.V., Kostianoy A.G., Solovyev D.M.* Evolution of mesoscale  
anticyclonic vortex and vortex dipoles/multipoles on its base in the  
South-Eastern Baltic (satellite information: May–July 2015).....10  
*Kuznetsov V.P.* To the theory of spectra of nonlinear waves in  
dissipative media .....23  
*Lazaryuk A.Yu., Kaplunenko D.D., Ostrovskii A.G.,  
Lobanov V.B., Trusenkova O.O., Ladychenko S.Yu.* Experimental  
studies of the thermohaline structure at the continental slope in the  
North-Western Japan Sea .....34  
*Lebedev K.V.* The Argo-based model for investigation of the Global Ocean:  
a synthesis of observations and numerical modeling .....53  
*Nikitin O.P.* International programs of global oceanographic  
observations and Russia’s participation in them .....70

**Biological oceanology**

*Astakhov D.A., Savinkin O.V.* Large clonal group of the obligate  
host sea anemone *Entacmaea quadricolor* founded without  
symbiotic fishes – environmental conditions impact .....90

**Marine geology, geophysics and geochemistry**

*Trubkin I.P., Nemirovskaya I.A.* Calculation of spatial-time characteristics of  
emergency spill of ship fuel in the coastal zone of the Kara sea .....99  
*Podgorny K.A., Leonov A.V.* Modelling of suspended matter  
distribution in marine coastal areas: 1. Description  
of the SM-model .....109  
*Podgorny K.A., Leonov A.V.* Modelling of suspended matter distribution in  
marine coastal areas: 2. Testing and practical a  
pplying of SM-model .....142

## Marine techniques

<i>Nosov A.V.</i> Some special aspect of termocompensation method use for autonomous signal recorders .....	163
<i>Poyarkov S.G., Rimsky-Korsakov N.A., Flint M.V.</i> Technical aspects of the environmental research of Kara sea Western part .....	171
<i>Rimsky-Korsakov N.A.</i> Technology structure of bottom and submarine objects sonar research .....	187

## History and personalities

The 100th anniversary of the Academician Leonid Maximovich Brekhovskikh .....	196
<i>Voronovich A.G.</i> Memories about L.M. Brekhovskikh .....	212
<i>Goncharov V.V., Vedenev A.I., Tsiplakova T.I.</i> Academician L.M. Brekhovskikh in the Ocean Acoustics Department of Shirshov Institute of Oceanology .....	216
<i>Ginzburg A.I., Zatsepin A.G.</i> To the 90th anniversary of Konstantin Nikolayevich Fedorov .....	231
<i>Zatsepin A.G.</i> To the 90th anniversary of Grigoriy Isaakovich Barenblatt .....	240
<i>Morozov E.G.</i> To the 100th anniversary of Walter Munk .....	244
<i>Sagalevich A.M.</i> To the 40th anniversary of submersibles “Pisces” and the 30th anniversary of submersibles “Mir” .....	249

## Information

<i>Badulin S.I.</i> XXVI Scientific session of the RAS Council on Nonlinear Dynamics .....	254
<i>Serebryanyi A.N., Goncharov V.V., Ostrovsky A.G.</i> XVI Academician L.M. Brekhovskikh school-seminar “Acoustics of the Ocean” .....	255
<i>Sviridov S.A., Zhmur V.V., Tarakanov R.Yu.</i> S.S.Voit Readings: I-st International Conference Modern Problems of Thermohydrodynamics of the Ocean «SPTO – 2017» .....	258

## Дорогие коллеги!

В начале 2017 г. Дирекция и Ученый Совет Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН приняли решение о восстановлении журнала «Океанологические исследования», который издавался в Институте с 1959 по 1993 год. Как правило, все выпуски журнала содержали результаты комплексных исследований Мирового океана по международным проектам. Первые номера журнала были посвящены результатам Международного геофизического года 1957–1958 гг., в начале 1970-х гг. они были посвящены эксперименту «Полигон-70», затем исследованиям западных пограничных течений в Атлантике, а с 1979 года – результатам Советско-американского эксперимента «ПОЛИМОДЕ». К сожалению, в 1993 году выпуск журнала завершился последним, 44-м номером.



В своих руках Вы держите новый, 45-й номер журнала «Океанологические исследования», который появился на свет благодаря усилиям редколлегии и редакции журнала. В сжатые сроки они смогли восстановить журнал в своих правах, получить все необходимые разрешительные документы на выпуск журнала в электронном и печатном виде, создать веб-сайт журнала (<http://www.jor.ocean.ru/>), а также собрать интересные материалы для публикации в новом номере. Приведены результаты исследований термохалинной структуры и вихревой динамики вод различных районов Мирового океана, моделирования процессов распространения взвешенного вещества в прибрежных акваториях, моделирования аварийных разливов нефтепродуктов, применения технических средств исследования морской среды, дна и подводных объектов, других физических и биологических процессов и явлений в океане.

В этом же номере Вы найдете раздел «Персоналии» о выдающихся океанологах, которые оставили заметный след в науке и работали рядом с нами многие годы. Среди них – Л.М. Бреховских и К.Н. Федоров; Григорий Исаакович Баренблатт отметил в этом году 90-летний юбилей, а Вальтер Манк (США) перешагнул вековой рубеж! Удивительным образом судьбы этих людей неоднократно пересекались в жизни, о чем свидетельствуют приведенные в журнале фотографии.

Желаю журналу «Океанологические исследования» творческих успехов, интересных материалов, публикационной активности авторов, полного «портфеля», высокой цитируемости и международного признания. Со своей стороны Дирекция

А.В. Соков

Института будет поддерживать становление журнала и его дальнейшее развитие, поскольку считает это одной из приоритетных задач в Стратегии развития ИО РАН.

А.В. Соков

Врио Директора ИО РАН, д.г.н.

**Dear Colleagues,**

In early 2017, the Directorate and the Academic Council of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (IO RAS) made a decision to revive the «Journal of Oceanological Research», which was published in the Institute from 1959 to 1993. As a rule, all issues of the Journal contained results of comprehensive studies of the World Ocean performed in international projects. The first issues of the Journal were devoted to the results of the International Geophysical Year of 1957–1958, in the early 1970s they were devoted to the «Polygon-70» experiment, then to the studies of the Western boundary currents in the Atlantic Ocean, and since 1979 – to the results of the Soviet-American experiment «POLIMODE». Unfortunately, in 1993, the last 44<sup>th</sup> issue marked the end of the Journal's publication.

In your hands you have the new 45<sup>th</sup> issue of the «Journal of Oceanological Research», which was born thanks to the efforts of the Editorial board and the Editorial staff. In a short time they managed to revive the Journal in its continuity, to obtain all the necessary permits for the publication of the Journal in an electronic and hard copy, to create a web-site of the Journal (<http://www.jor.ocean.ru/>), and also to collect engaging materials for publication in a new issue. In the Journal you will find the results of investigations of the thermohaline structure and vortex dynamics of waters in various regions of the World Ocean, modeling of the processes of distribution of suspended matter in coastal waters, modeling of oil spills, application of technical means to study the marine environment, the bottom and underwater objects, other physical and biological processes and phenomena in the ocean.

In the same issue you will find the section “Personalities” about outstanding oceanographers who left a visible mark in science and worked with us for many years. Among them are L.M. Brekhovskikh and K.N. Fedorov; this year, Grigory Isaakovich Barenblatt has celebrated his 90<sup>th</sup> anniversary, and Walter Munk (USA) – his 100<sup>th</sup> anniversary! Surprisingly, the paths of these people repeatedly crossed in life, as evidenced by the photographs in the Journal.

I wish the «Journal of Oceanological Research» success, impressive materials, publication activity of contributors, a reach “portfolio”, high citation, and international recognition. The Directorate of the Institute will support the development of the Journal, since we consider this to be one of the priority tasks in the Development Strategy of the IO RAS.

Dr. A.V. Sokov

Interim Director P.P. Shirshov Institute of Oceanology



## ИСТОРИЯ ЖУРНАЛА «ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ»

**Е.Г. Морозов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [egmorosov@mail.ru](mailto:egmorosov@mail.ru)*

Статья поступила в редакцию 15.12.2017, одобрена к печати 20.12.2017



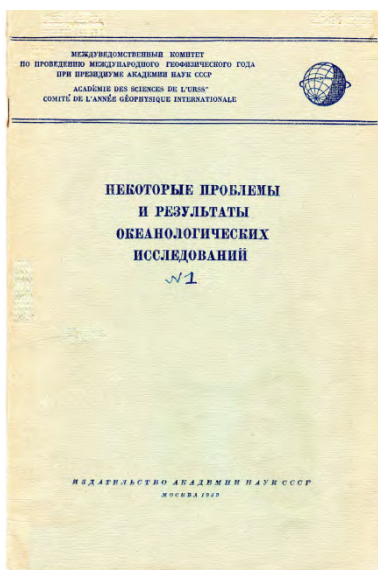
Заведующий Лабораторией гидрологических процессов ИОРАН,  
Президент Международной ассоциации физических наук об океане (IAPSO) (2011–2015)  
Председатель Секции Физических наук об океане  
Национального геофизического комитета РАН

История журнала Океанологические исследования началась с создания Национального геофизического комитета во время проведения Международного геофизического года 1957–1958 гг. (МГГ). МГГ явился преемником двух Международных полярных годов (МПП), которые проводились в 1882–1883 и в 1932–1933 гг. Предложение провести Международный геофизический год исходило от Международного геодезического и геофизического союза (International Union of Geodesy and Geophysics) В составе Комитета были образованы секции:

Геомагнетизма	Океанографии
Гляциологии	Планетарной геофизики
Гравиметрии	Полярных сияний
Долгот и широт	Ракет и искусственных спутников Земли
Ионосферы	Сейсмологии
Метеоров	Солнечной активности и космических лучей
Метеорологии и физики атмосферы	

Практически каждая секция основала свой журнал. Секция океанографии публиковала журнал «Океанологические исследования» с 1959 г. Главным редактором всей серии был член-корреспондент АН СССР Ю.Д. Буланже. Всю редакционную работу выполняла группа редакторов под руководством Б.И. Силкина.

Начиная с образования Междуведомственного Комитета Секцию океанографии возглавлял член-корреспондент АН СССР В.Г. Корт. Учеными секретарями Секции были Н.Н. Сысоев, И.М. Белоусов, Р.П. Булатов и с 1976 г. Е.Г. Морозов. После тяжелой болезни В.Г. Корта в 1988 г. Секцию возглавил член-корреспондент АН СССР Р.В. Озмидов, а после его смерти с 1988 года Секцию возглавляет д.ф.-м.н. Е.Г. Морозов.



Первые выпуски «Океанологических исследований» были посвящены результатам Международного геофизического года. Ответственными за выпуски журналов по линии Междуведомственного геофизического комитета всегда были ученые секретари секций. Ответственным за выпуски первых номеров, посвященных МГГ, был Н.Н. Сысоев. Затем до 1972 г. выпуски курировал И.М. Белоусов. Выпуски журнала начала 1970 годов посвящались эксперименту «Полигон-70», затем исследованиям западных пограничных течений в Атлантике. Ученым Секретарем Секции с 1972 по 1976 гг. был Р.П. Булатов. С 1976 по 1988 г. Ученым Секретарем был Е.Г. Морозов. Большое

количество выпусков, начиная с № 30 в 1979 году, было посвящено результатам Советско-американского эксперимента «ПОЛИМОДЕ». Все выпуски журнала были, как правило, посвящены результатам исследований по международным проектам. Выпуски «Океанологических исследований» закончились в 1993 г. последним 44-м номером.

В 1998 г. Национальный геофизический комитет РАН начал выпускать электронный журнал Russian Journal of Earth Sciences.

В 2017 г. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН принял решение выпускать свой электронный журнал. По согласованию с Национальным геофизическим комитетом РАН было решено продолжить выпуски «Океанологических исследований», то есть выпускать новый электронный журнал, продолжая серию ранних публикаций.



## HISTORY OF THE «OCEANOLOGICAL RESEARCHES» JOURNAL

**E.G. Morozov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [egmorosov@mail.ru](mailto:egmorosov@mail.ru)*

Submitted 15.12.2017, accepted 20.12.2017

The history of the «Oceanological Researches» Journal started from the organization of the National Geophysical Committee during the International Geophysical Year in 1957–1958 (IGY). The IGY continued the researches started during the two International Polar Years in 1882–1883 and 1932–1933. The idea of the International Geophysical Year was suggested by the International Union of Geodesy and Geophysics.

The following Sections were organized within the National Geophysical Committee:

Aurora and airglow	Latitude and longitude
Cosmic rays	Meteors
Geomagnetism	Meteorology and atmospheric physics
Glaciology	Oceanology
Global geophysics	Space rockets and artificial satellites
Gravimetry	Seismology
Ionosphere	Solar activity

Almost every section organized its journal. The Oceanology Section has been publishing «Oceanological Researches» since 1959. The Corresponding Member of the Academy of Sciences Yu.D. Boulanger was the Chief Editor of the whole series of journals. The editorial work was carried out by the group of editors headed by B.I. Silkin.

Beginning from the organization of the Geophysical Committee, the Oceanology Section has been headed by the Corresponding Member of the Academy of Sciences V.G. Kort. The Scientific Secretaries of the Section were N.N. Sysoev, I. M. Belousov, R.P. Bulatov, and from 1976 E.G. Morozov. After severe illness of V.G. Kort, the Head of the section in 1988 became the Corresponding Member of the Academy of Sciences R.V. Ozmidov, and after his death in 1998 the Section has been headed by Dr. Sci. in Physics and Mathematics E.G. Morozov.

The first issues of the «Oceanological Researches» were dedicated to the results of the International Geophysical Year. The scientific secretaries of the Section were always responsible for the issues. N.N. Sysoev was responsible for the issues of the first numbers dedicated to the IGY. Then, up to 1972, I.M. Belousov was responsible for these issues. The issues of the Journal in the 1970s were dedicated to the Polygon-70 experiment, and then the issues were related to the western boundary currents in the Atlantic. From 1972 to 1976, R.P. Bulatov was the Scientific Secretary responsible for the issues and then from 1976 to 1988 this work has been done by E.G. Morozov. Many issues starting from № 30 in 1979 were dedicated to the results of the USSR-USA POLYMODE Experiment. Generally all the issues were related to the results of researches on international programs. The issues of the «Oceanological Researches» terminated in 1993 by the last number 44.

In 1998, the National Geophysical Committee organized a new journal Russian Journal of Earth Sciences.

In 2017, the Shirshov Institute of Oceanology decided to continue this series and organized its electronic journal. According to the agreement with the National Geophysical Committee it was decided to continue the issues of the «Oceanological Researches», thus publish a new journal continuing the series of the previous publications.

**ЭВОЛЮЦИЯ МЕЗОМАСШТАБНОГО АНТИЦИКЛОНИЧЕСКОГО ВИХРЯ  
И ВИХРЕВЫХ ДИПОЛЕЙ/МУЛЬТИПОЛЕЙ НА ЕГО ОСНОВЕ  
В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ  
(СПУТНИКОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ: МАЙ–ИЮЛЬ 2015 г.)**

**А.И. Гинзбург<sup>1</sup>, Е.В. Крек<sup>1</sup>, А.Г. Костяной<sup>1</sup>, Д.М. Соловьев<sup>2,1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,  
e-mail: [ginzburg@ocean.ru](mailto:ginzburg@ocean.ru), [kostianoy@gmail.com](mailto:kostianoy@gmail.com), [elenka\\_krek@mail.ru](mailto:elenka_krek@mail.ru)*  
<sup>2</sup>*Морской гидрофизический институт, 299002,  
г. Севастополь, e-mail: [solmit@gmail.com](mailto:solmit@gmail.com)*

Статья поступила в редакцию 06.11.2017, одобрена к печати 25.12.2017

На основе анализа последовательных спутниковых оптических (MODIS-Aqua/Terra, AVHRR NOAA-18, VIIRS-SNPP, TIRS и OLI Landsat-8, ETM+ Landsat-7) и радиолокационных (Sentinel-1A, Radarsat-2) изображений прослежена эволюция мезомасштабного антициклонического вихря диаметром около 35 км с присоединенными циклонами (от двух до четырех) на его периферии на протяжении более полутора месяцев (с 15 мая по 7 июля 2015 г.) в Юго-Восточной Балтике. В течение примерно месяца положение антициклона мало менялось (центр – в среднем на 54°55' с.ш., 19°15' в.д.), однако в интервале 22 июня – 1 июля вихревой диполь, образованный этим антициклоном и циклоном на его северной периферии с диаметром, соизмеримым с диаметром антициклона, двигался в восточном направлении со средней скоростью около 4 км/сут. Предполагается, что такому перемещению квазисимметричного вихревого диполя способствовали его расположение севернее Гданьского залива и свойство диполя (грибовидного течения) двигаться в направлении его струйной части при ветровом воздействии (в данном случае при усилении западного ветра).

**Ключевые слова:** Юго-Восточная Балтика, радиолокационные изображения, оптические изображения, мезомасштабные вихри, вихревые диполи, горизонтальное перемешивание вод

### **Введение**

Вихревые диполи (грибовидные течения) – одна из наиболее распространенных форм когерентных движений вод в океане/море (Федоров и Гинзбург, 1988, 1992). Перенос воды в направлении струйной части структуры с вовлечением окружающих вод внутрь вихрей диполя, а также свойство грибовидных течений образовывать сложные мультипольные структуры (упаковки и разветвление первоначальных вихрей пары во вторичные диполи) делают эти течения эффективным механизмом перемешивания в океане/море. Вихревой механизм перемешивания особенно важен для внутренних морей с ограниченным водообменом с открытым океаном, подверженных интенсивному антропогенному воздействию за счет стока рек, отходов курортных зон и промышленных центров на берегах, нефти и т. д. Таким является внутреннее Балтийское море и особенно его юго-восточная часть – аква-

тория интенсивного судоходства, следствием чего является ее нефтяное загрязнение из-за утечки или сброса нефтепродуктов с морских судов (см., например, (Булычева и др., 2016; Лаврова и др., 2016)). В Балтийском море отсутствуют интенсивные постоянные течения, а скорость непостоянных по направлению дрейфовых течений, вызванных ветром, чаще всего не превышает 10–15 см/с (Гидрометеорология..., 1992). В таком случае вклад вихревых течений в процесс горизонтального перемешивания может быть определяющим (Гинзбург и др., 2015б).

Спутниковыми наблюдениями разных лет установлено, что Балтийское море – акватория с интенсивным вихреобразованием (Horstmann, 1983; Лаврова, 2005; Lavrova et al., 2008; Каримова и др., 2011; Гурова и Иванов, 2011; Лаврова и др., 2011; Гурова, 2012; Gurova and Chubarenko, 2012; Гинзбург и др., 2015 а, б; Tavri et al., 2016). При этом характерным элементом как мезомасштабных, так и субмезомасштабных вихревых движений (диаметр соответственно больше или меньше бароклинного радиуса деформации Россби, не превышающего в Балтике 10 км и 5–6 км в районе Гданьского залива) являются вихревые диполи и их упаковки (Гинзбург и др., 2015а). Однако информация о времени жизни мезомасштабных вихрей в Балтийском море практически отсутствует: известно лишь одно наблюдение существования мезомасштабного антициклона в юго-восточной части Балтики в течение двух недель в июле–августе 2004 г. (Lavrova et al., 2008; Гинзбург и др., 2015б). Неизвестны также пути перемещения вихрей по рассматриваемой акватории и механизмы вихреобразования. В данной статье на основе последовательных спутниковых изображений прослежена эволюция мезомасштабного антициклонического вихря с присоединенными циклонами на его периферии на протяжении более полутора месяцев, в том числе перемещение образовавшегося на его основе квазисимметричного вихревого диполя в восточном направлении.

### Данные

В целях прослеживания эволюции мезомасштабного антициклонического вихря анализировались оптические и радиолокационные (РЛИ) спутниковые изображения, полученные в мае–июле 2015 г.: последовательные оптические изображения радиометров MODIS спутников Terra и Aqua (пространственное разрешение  $R = 250$  м) и VIIRS-SNPP ( $R = 750$  м) с временным интервалом, в основном, 1–2 дня в периоды с 15 по 31 мая, с 3 по 17 июня, с 22 по 28 июня и с 1 по 7 июля, AVHRR NOAA-18 (9–11 июня,  $R = 1$  км), TIRS Landsat-8 (8 июня,  $R = 100$  м), ETM+ Landsat-7 (2 июля,  $R = 60$  м) и OLI Landsat-8 (3 июля,  $R = 30$  м); РЛИ радаров с синтезированной апертурой (SAR) спутников Sentinel-1A (3 июля,  $R = 10$  м) и Radarsat-2 (24 мая,  $R = 100$  м).

Отметим, что на майских и июньских изображениях в поле хлорофилла вихревые структуры проявлялись менее четко, чем в поле температуры поверхности воды, поэтому для анализа использовались в основном ИК-изображения (трассер – прогретые воды прибрежной зоны, вовлекаемые вихрями). Нечеткое проявление вихрей на майских–июньских изображениях видимого диапазона связано с



пространственной неоднородностью цветения водорослей и, возможно, с необычно поздним началом массового цветения цианобактерий в 2015 году (обычно оно приходится на июнь) из-за холодной погоды (Oberг, 2016; Лаврова и др., 2016). Температура поверхностного слоя моря летом (в июле) 2015 г. была одной из наиболее низких за период с 2003 по 2015 гг., а соленость – самой высокой за этот период в результате мощного затока североморских вод зимой 2014–2015 гг. (Щука Т. и Щука С., 2016).

Скорость и направление ветра определялись по метеорологическим данным для открытой части моря по ежедневным прогнозам Междисциплинарного центра математического и компьютерного моделирования Варшавского университета ([http://www.meteo.pl/index\\_en.php](http://www.meteo.pl/index_en.php)).

### Эволюция мезомасштабного антициклонического вихря с присоединенными циклонами

Последовательность спутниковых изображений оптического диапазона дает возможность проследить эволюцию антициклона в течение полутора месяцев – с 15 мая до 7 июля 2015 г. (отсутствие изображений до 15 мая не позволяет определить дату его появления в данном регионе, а разрыв в имеющейся информации между 7 и 16 июля, когда вихрь уже не проявлялся на изображениях, – дату его диссипации). Некоторые из проанализированных последовательных оптических спутниковых изображений представлены на рис. 1–11.

На рис. 1 хорошо виден антициклонический вихрь диаметром  $D$  примерно 35 км с центром на  $54^{\circ}58'$  с.ш.,  $19^{\circ}10'$  в.д. и два присоединенных циклона на его

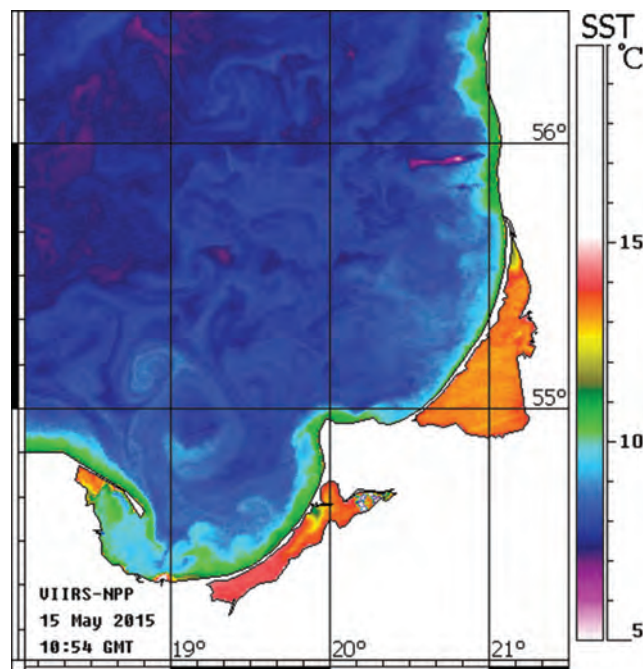


Рис. 1. Фрагмент ИК-изображения радиометра VIIRS-SNPP, 15.05.2015, 10:54 GMT.

северо-западной и юго-восточной периферии ( $D \approx 15\text{--}20$  км). Образовавшаяся структура поворачивалась по часовой стрелке, и к 25 мая струйная часть диполя из антициклона и циклона на его северной периферии приобрела зональную ориентацию (рис. 2) (на РЛИ Radarsat-2 видна только часть антициклона). На изображении 31 мая (рис. 3) различим триполь со струйной частью примерно юго-восточного (северо-западного) направления между антициклоном и циклоном на северо-востоке (юго-западе).

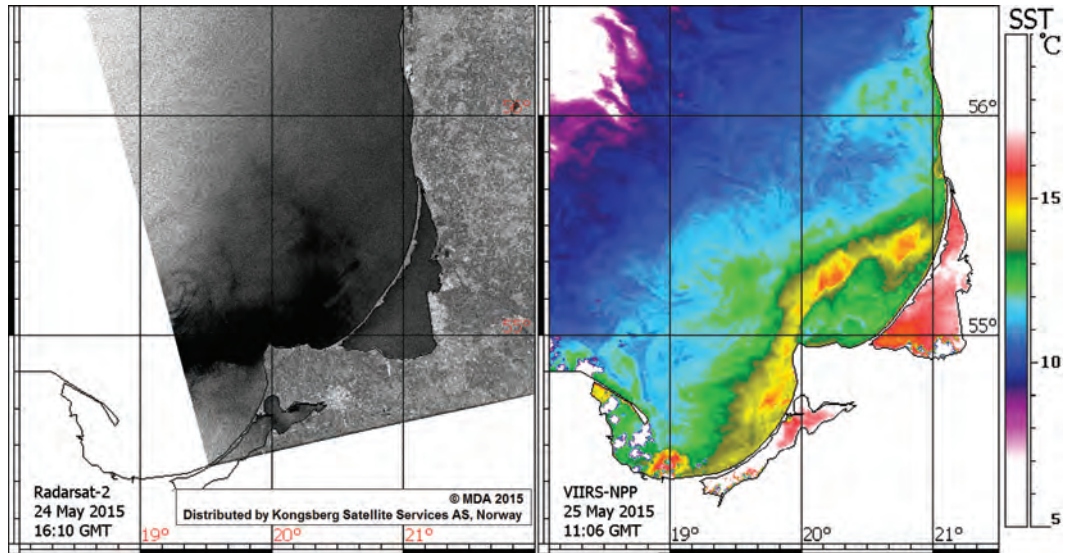


Рис. 2. Фрагменты РЛИ SAR Radarsat-2 24.05.2015, 16:10 GMT (слева) и ИК-изображения радиометра VIIRS-SNPP, 25.05.2015, 11:06 GMT (справа).

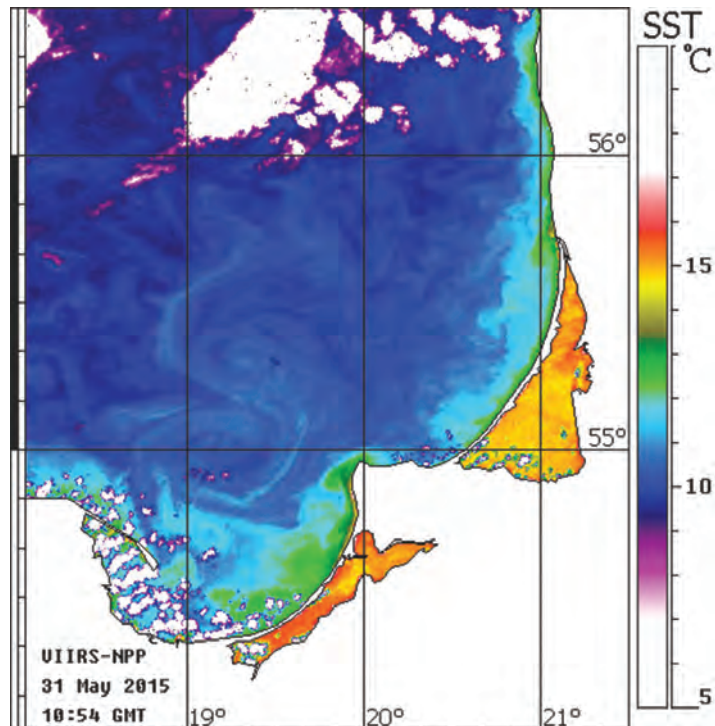


Рис. 3. Фрагмент ИК-изображения радиометра VIIRS-SNPP, 31.05.2015, 10:54 GMT.

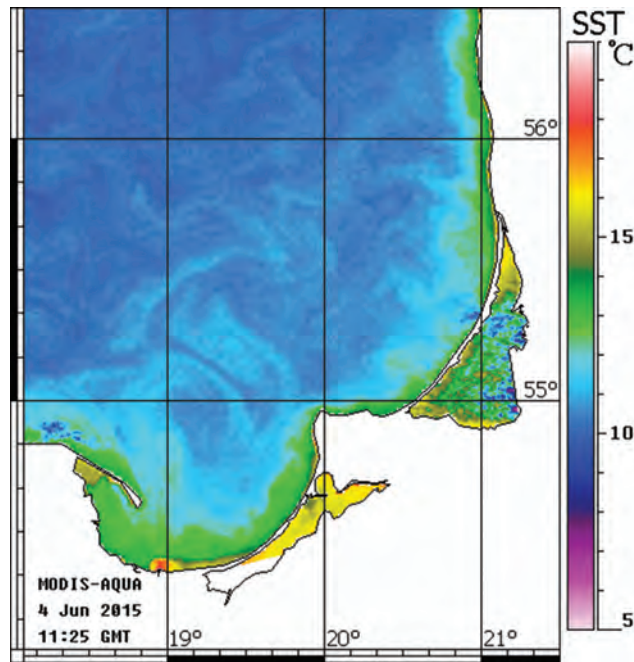


Рис. 4. Фрагмент ИК-изображения радиометра MODIS-Aqua, 04.06.2015, 11:25 GMT.

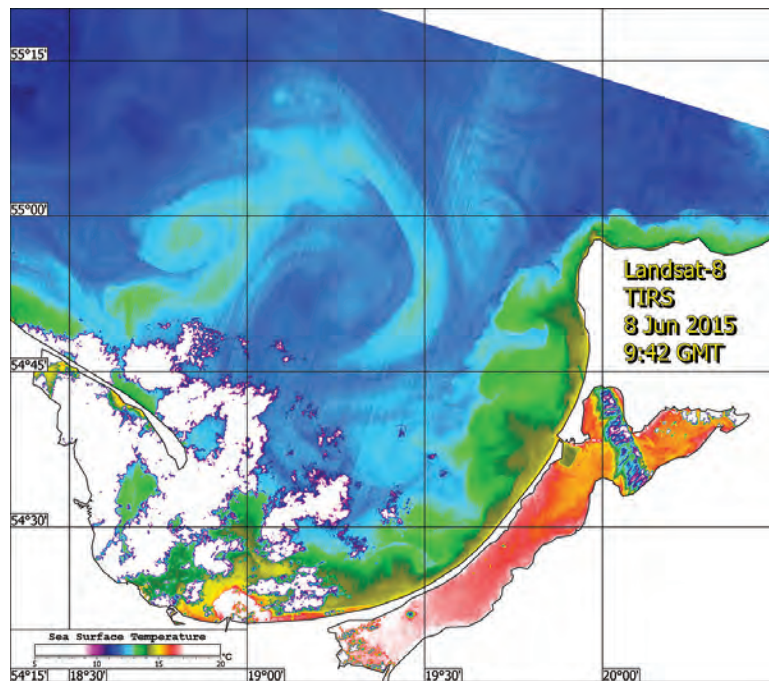


Рис. 5. Фрагмент ИК-изображения радиометра TIRS Landsat-8, 08.06.2015, 09:42 GMT.

С 3 по 10 июня (рис. 4–5) антициклон практически сохранял свое положение с координатами центра примерно на  $54^{\circ}55'$  с.ш.,  $19^{\circ}15'$  в.д. (со смещениями в меридиональном направлении в пределах примерно 10 километров). При этом на изображении Landsat-8 с высоким разрешением (рис. 5) можно видеть четыре присоединенных циклона на западной, северной, восточной и южной пери-



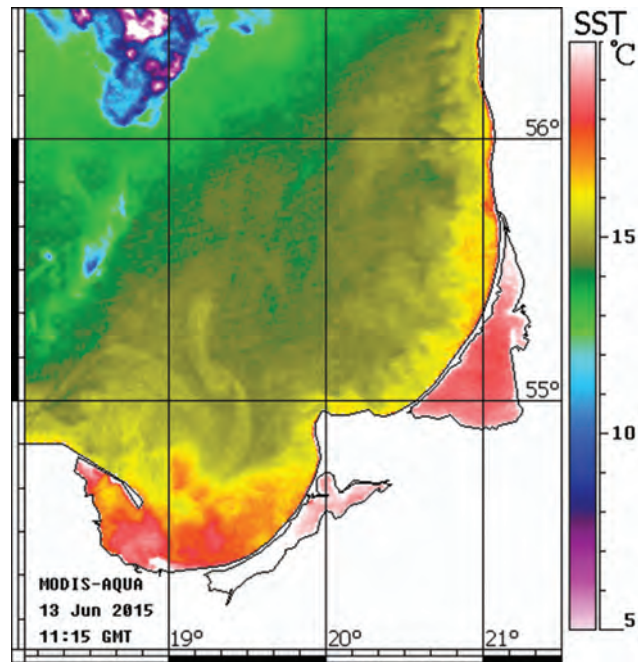


Рис. 6. Фрагмент ИК-изображения радиометра MODIS-Aqua, 13.06.2015, 11:15 GMT.

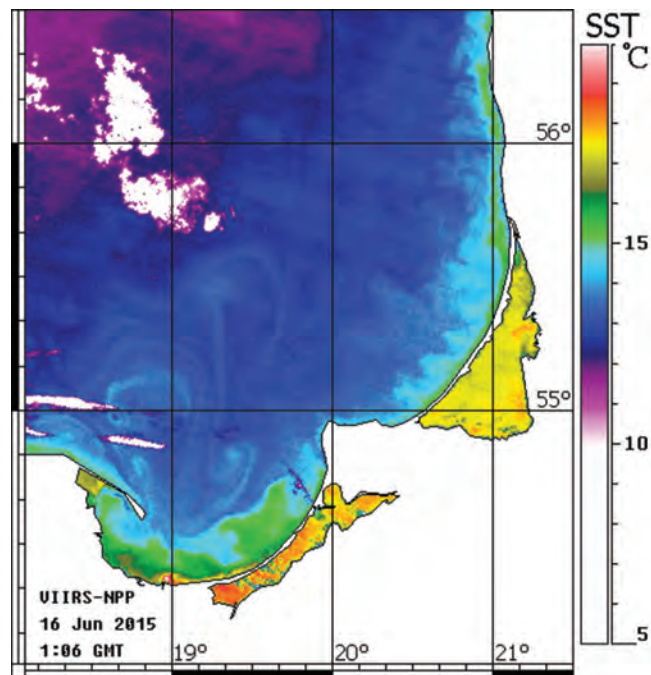


Рис. 7. Фрагмент ИК-изображения радиометра VIIRS-SNPP, 16.06.2015, 01:06 GMT.

ферии антициклона. Два дня спустя (12 июня) центр антициклонического вихря сместился немного на юг, 13 июня – на запад (рис. 6), а 16 июня (рис. 7) вихрь приблизился к косе Хель (центр антициклона – примерно на  $54^{\circ}55'$  с.ш.,  $18^{\circ}55'$  в.д.) и на его западной периферии появился небольшой циклон. Через сутки (17 июня, изображение не показано) вихревой диполь (комбинация этого антициклона и циклонического вихря на его юго-восточной периферии), имевший 16 июня

почти меридиональную ориентацию струйной части (рис. 7), развернулся примерно на  $45^\circ$  в антициклоническом направлении; центр его антициклонической части оказался примерно на  $55^\circ 00'$  с.ш.,  $19^\circ 00'$  в.д., а диаметр присоединенного циклона на северо-западной периферии увеличился. Между 17 и 22 июня спутниковая информация отсутствовала, однако тот же размер антициклона и те же координаты его центра на

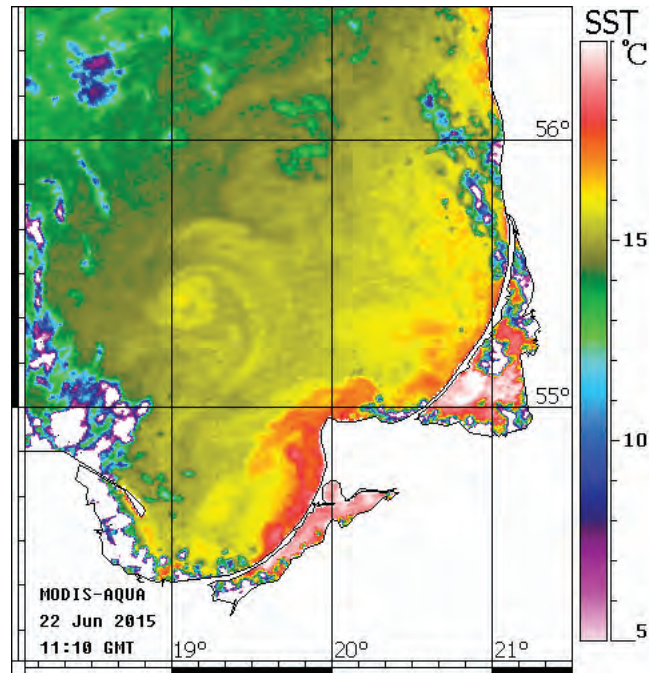


Рис. 8. Фрагмент ИК-изображения радиометра MODIS-Aqua, 22.06.2015, 11:10 GMT.

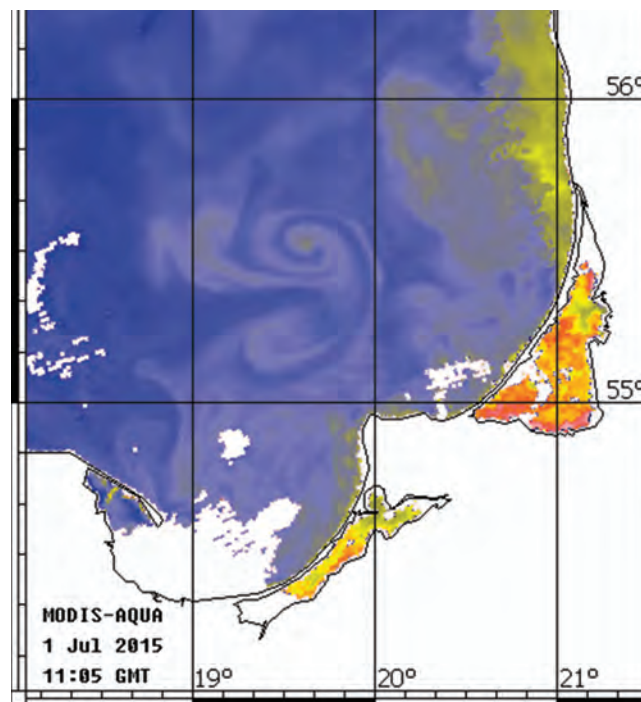


Рис. 9. Фрагмент оптического изображения радиометра (восходящее излучение) MODIS-Aqua, 01.07.2015, 11:05 GMT.



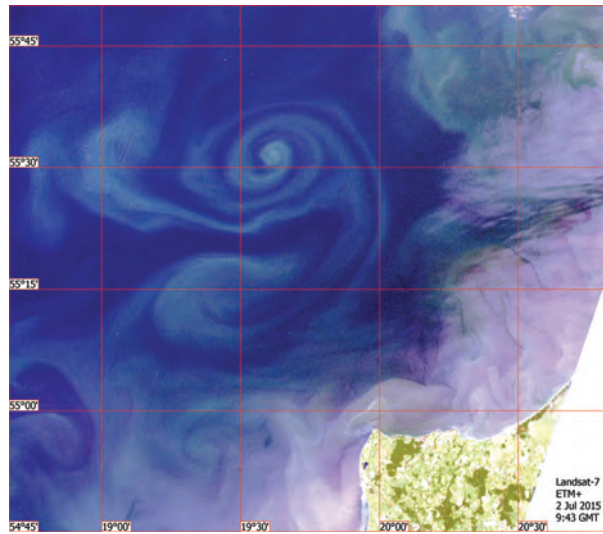


Рис. 10. Фрагмент оптического изображения радиометра ETM+ Landsat-7, 02.07.2015, 09:43 GMT.

рис. 8, что и на изображении 17 июня, позволяют полагать, что это один и тот же мезомасштабный вихрь.

На северной периферии этого антициклона виден интенсивный циклон с четко выраженной спиралевидной структурой и диаметром ( $\approx 30$  км), соизмеримым с диаметром антициклона (рис. 8). Вновь образовавшийся квазисимметричный диполь, фронт «шляпки» которого 22 июня находился на  $19^{\circ}35'$  в.д., начал перемещаться в восточном направлении. К 26 июня фронт диполя достиг  $19^{\circ}50'$  в.д., к 1 июля –  $20^{\circ}$  в.д. (рис. 9) и далее до 7 июля заметно не продвигался; центр антициклона оказался на  $55^{\circ}15'$  с.ш.,  $19^{\circ}30'$  в.д. Этот диполь отчетливо проявился на спутниковом изображении ETM+ Landsat-7 2 июля (рис. 10), а также OLI Landsat-8 и РЛИ SAR-C Sentinel-1A 3 июля (рис. 11). Средняя скорость перемещения фронта диполя и центра антициклона за период с 22 июня по 1 июля составила примерно

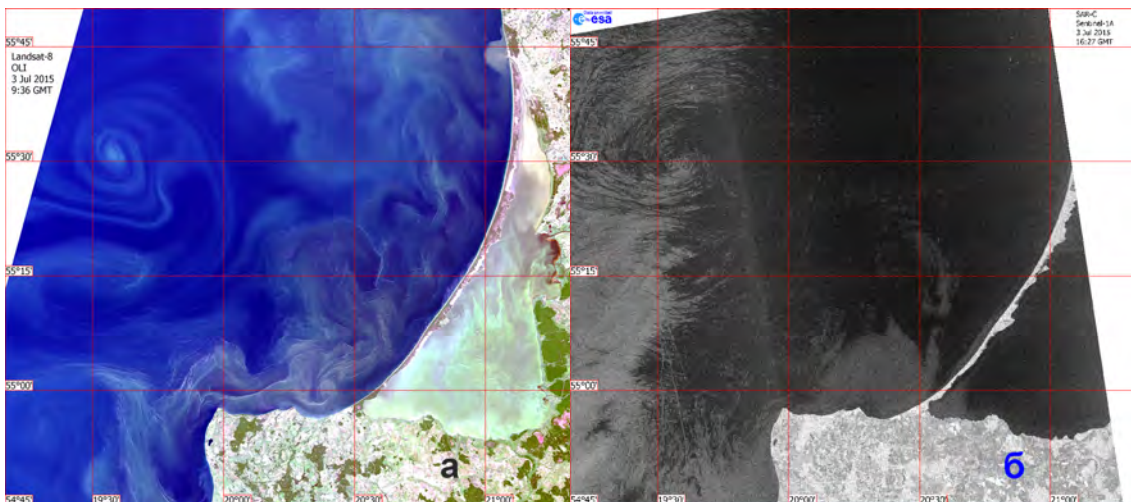


Рис. 11. Фрагменты оптического изображения радиометра OLI Landsat-8, 03.07.2015, 09:36 GMT (а) и РЛИ SAR-C Sentinel-1A 03.07.2015, 16:27 GMT (б).

4 км/сут. К 7 июля (изображение не показано) этот диполь изменил ориентацию – повернулся примерно на  $45^\circ$  в антициклоническом направлении. При этом центр антициклона немного сместился к югу ( $55^\circ 10'$  с.ш.,  $19^\circ 30'$  в.д.). На изображении 16 июля проявление данной вихревой структуры отсутствовало.

### Обсуждение

Анализ последовательных оптических и радиолокационных спутниковых изображений в мае–июле 2015 г. показал, что время жизни мезомасштабного антициклонического вихря с диаметром примерно 35 км в Юго-Восточной Балтике может быть более полутора месяцев (время его наблюдения – с 15 мая по 7 июля). В течение этого времени центр антициклона менял свое положение в пределах  $54^\circ 50'–55^\circ 15'$  с.ш.,  $18^\circ 55'–19^\circ 30'$  в.д., причем большую часть своего жизненного цикла (до начала перемещения в восточном направлении, т.е. до 22 июня) центр антициклона находился в пределах  $54^\circ 50'–55^\circ$  с.ш.,  $18^\circ 55'–19^\circ 15'$  в.д. с глубиной около 100 м (на акватории Гданьского залива, ограниченной с запада и востока резкими изменениями глубины от 20 до 100 м). Заметим, что антициклонические вихри с диаметром 20–35 км и координатами центра примерно в том же диапазоне координат неоднократно наблюдались нами на единичных спутниковых изображениях, полученных в июне–августе в разные годы (Horstmann, 1983; Лаврова, 2005; Lavrova et al., 2008; Гинзбург и др. 2015а, б). Четко прорисованная спиралевидная форма, как уже отмечалось в работе (Гинзбург и др., 2015а), характерна только для циклонической составляющей диполя.

Эволюция антициклонического вихря в мае–июле 2015 г., как и в июле–августе 2004 г. (Гинзбург и др., 2015б), сопровождалась образованием на его периферии присоединенных циклонов 10–20 км в диаметре, в данном случае от двух до четырех (см. рис. 5), перемещавшихся по его периферии в антициклоническом направлении. Характерные места образования присоединенных циклонов – западный (мористее косы Хель) и юго-восточный участки периферии антициклона, что обусловлено, по-видимому, конфигурацией рельефа дна Гданьского залива и горизонтальным сдвигом скорости между антициклоническим движением вод и склонами дна залива.

Время жизни наиболее крупного циклона (примерно 30 км) на северной периферии антициклонического вихря составило по крайней мере 15 дней (формирование – не позже 22 июня, последнее наблюдение – 7 июля). Возможно, что движению диполя в восточном направлении в интервале 22 июня – 1 июля со средней скоростью около 4 км/сут способствовало несколько факторов: (i) образование квазисимметричного вихревого диполя из соизмеримых по размеру антициклона и циклона с зонально ориентированной струйной частью (рис. 8–10); (ii) расположение диполя за пределами (севернее) Гданьского залива и, соответственно, возможность перемещения на восток; (iii) свойство диполя (грибовидного течения) перемещаться в направлении его зонально ориентированной (в данном случае) струйной части при ветровом воздействии (усиление ветра западного направления до 11–13 м/с

имело место 24 июня). Вопрос о причинах, вызывающих перемещения диполей по акватории, требует дальнейших исследований.

Вовлечение вод по периферии присоединенного циклона нередко приводит к образованию нового диполя, антициклон нового диполя образует следующий диполь и т. д., т. е. образуются компактные упаковки вихревых диполей (см. схему на рис. 5.7 в работе (Федоров и Гинзбург, 1988)). Примеры подобных короткоживущих (несколько дней) образований можно видеть на представленных изображениях. Так, на рис. 8 упаковка из вихревых диполей примерно меридиональной ориентации прослеживается до 56° с.ш. На рис. 10 циклон сравнительно «долгоживущего» диполя образует новый диполь с небольшим антициклоническим вихрем на его западной периферии и струйной частью южного направления. Таким образом осуществляется горизонтальный водообмен на площади, превышающей размер исходной вихревой структуры.

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» за предоставленные радиолокационные данные. А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной и Д.М. Соловьев проводили исследование за счет бюджетного финансирования (тема № 3 «Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований, дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования»). Е.В. Крек выполняла исследования по теме № 0149-2018-0012 «Морские природные системы Балтийского моря и Атлантического океана: формирование природных комплексов Балтийского моря и их изменение под влиянием Атлантического океана и антропогенного воздействия».

## Литература

- Булычева Е.В., Костяной А.Г., Крек А.В. Межгодовая изменчивость нефтяного загрязнения морской поверхности Юго-Восточной Балтики в 2004-2015 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 74–84.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект “Моря СССР”. Т. III. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф.С. Терзиева, В.А. Рожкова, А.И. Смирновой. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 450 с.
- Гинзбург А.И., Булычева Е.В., Костяной А.Г., Соловьев Д.М. Вихревая динамика в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковой радиолокации // Океанология. 2015а. Т. 55. № 6. С. 893–902.
- Гинзбург А.И., Булычева Е.В., Костяной А.Г., Соловьев Д.М. О роли вихрей в распространении нефтяных загрязнений по акватории Юго-Восточной Балтики (по данным спутникового мониторинга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015б. Т. 12. № 3. С. 149–157.
- Гурова Е.С. О формировании и динамике вихря у побережья Юго-Восточной Балтики по данным дистанционного зондирования // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2012. Вып. 1. С. 16–21.
- Гурова Е.С., Иванов А.Ю. Особенности проявления гидродинамических структур в Юго-Восточной части Балтийского моря по данным спектрорадиометров MODIS и

А.И. Гинзбург и др.

- космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 4. С. 41–54.
- Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М.* Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 15–23.
- Лаврова О.Ю.* Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. С. 118–123.
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
- Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
- Федоров К.Н., Гинзбург А.И.* Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
- Федоров К.Н., Гинзбург А.И.* Грибовидные течения (вихревые диполи) – одна из наиболее распространенных форм когерентных движений в океане // Когерентные структуры и самоорганизация океанских движений. М.: Наука, 1992. С. 12–20.
- Щука Т.А., Щука С.А.* Динамика количественных характеристик чужеродных видов зоопланктона в юго-восточной части Балтийского моря в июле 2003-2015 гг. в связи с термохалинными условиями // ПЭММЭ. 2016. Т. XXVII. №. 1. С. 86–108.
- Gurova E., Chubarenko B.* Remote sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // *Oceanologia*. 2012. Vol. 54. No. 4. P. 631–654.
- Horstmann U.* Distribution Patterns of Temperature and Water Colour in the Baltic Sea as recorded in Satellite Images: Indicators for Phytoplankton Growth. *Berichte Institute fur Meereskunde, Kiel*. 1983. Vol. 1. No. 106. 147 p.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova N., Gade M.* Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // *Remote Sensing of the European Seas / V. Barale, M. Gade (Eds.)*. Springer Verlag, 2008. P. 463–474.
- Oberg J.* Cyanobacteria blooms in the Baltic Sea, HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets, 2016. URL: <http://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/cyanobacterial-blooms-in-the-baltic-sea/>.
- Tavri A, Singha S, Lehner S, Topouzelis K.* Observation of sub-mesoscale eddies over Baltic Sea using TERRASAR-X and oceanographic data. Proc. ‘Living Planet Symposium 2016’, Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016. (ESA SP-740, August 2016).



**EVOLUTION OF MESOSCALE ANTICYCLONIC VORTEX AND VORTEX  
DIPOLES/MULTIPOLES ON ITS BASE IN THE  
SOUTH-EASTERN BALTIC  
(SATELLITE INFORMATION: MAY–JULY 2015)**

**A.I. Ginzburg<sup>1</sup>, E.V. Krek<sup>1</sup>, A.G. Kostianoy<sup>1</sup>, D.M. Solovyev<sup>2, 1</sup>**

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [ginzburg@ocean.ru](mailto:ginzburg@ocean.ru), [kostianoy@gmail.com](mailto:kostianoy@gmail.com), [elenka\\_krek@mail.ru](mailto:elenka_krek@mail.ru)*

<sup>2</sup> *Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, 299002, Russia  
e-mail: [solmit@gmail.com](mailto:solmit@gmail.com)*

Submitted 06.11.2017, accepted 25.12.2017

Based on the analysis of a sequence of optical (MODIS-Aqua / Terra, AVHRR NOAA-18, VIIRS-SNPP, TIRS and OLI Landsat-8, ETM + Landsat-7) and radar (Sentinel-1A, Radarsat-2) satellite images, the evolution of mesoscale anticyclonic vortex with a diameter of about 35 km and associated cyclones (two to four) at its periphery was traced for more than a month and a half (from May 15 to July 7, 2015) in the South-Eastern Baltic. Within about a month the position of the anticyclone varied little (center – at about 54° 55' N, 19° 15' E), but in the interval from June 22 to July 1 the vortex dipole formed by this anticyclone and the cyclone at its northern periphery with a diameter comparable with the diameter of the anticyclone moved eastward with an average speed of about 4 km/day. It is assumed that such movement of this quasisymmetric vortex dipole was due to its location to the north of the Gdansk Bay and the property of a dipole (mushroom-like current) to move in the direction of its jet part under wind forcing (in this case, with the strengthening of the westerly wind).

**Keywords:** the South-Eastern Baltic, radar images, optical images, mesoscale vortices, vortex dipoles, horizontal water mixing

### References

- Bulycheva E.V., Kostianoy A.G., Krek .V. Mezhgodovaya izmenchivost neftianogo zagriazneniya morskoy poverkhnosti Yugo-Vostochnoj Baltiki v 2004–2015 gg. (Interannual variability of sea surface oil pollution in the southeastern Baltic Sea in 2004–2015), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 74–84.*
- Fedorov K.N., Ginzburg A.I. Pripoverkhnostnyi sloi okeana (The Near-surface layer of the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 303 p.*
- Fedorov K.N., Ginzburg A.I. Gribovidnye techeniya (vikhrevye dipoli) – odna iz naibolee rasprostranennykh form kogerentnykh dvizhenii v okeane (Mushroom-like currents (vortex dipoles) – one of the most common forms of coherent movement in the ocean), Kogerentnyye structurey i samoorganizatsiya okeanskikh dvizhenii, Moskva: Nauka, 1992, pp. 12–20.*
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR. Proekt “Moria SSSR” (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Project “The seas of the USSR”), Vol. III, The Baltic Sea, Issue 1, Hydrometeorological conditions / ed. F.S. Terziev, V.A. Rozhkov, A.I. Smirnova, St. Peterburg: Gidrometeoizdat, 1992, 450 p.*
- Ginzburg A.I., Bulycheva E.V., Kostianoy A.G., Solovyev D.M. Vortex dynamics in the Southeastern Baltic Sea from satellite radar data, *Oceanology*, 2015a, Vol. 55, No. 6, pp. 805–813.*
- Ginzburg A.I., Bulycheva E.V., Kostianoy A.G., Solovyev D.M. O roli vikhrei v rasprostranenii*



- neftianyh zagriaznenii po akvatorii Yugo-Vostochnoj Baltiki (po dannym sputnikovogo monitoring) (On the role of vortices in the transport of oil pollution in the southeastern Baltic Sea (according to satellite monitoring)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 20156, Vol. 12, No. 3, pp. 149–157.
- Gurova E.S. O formirovanii i dinamike vikhria u poberezhii Yugo-vostochnoi Baltiki po dannym distantsionnogo zondirovaniia (On formation and dynamics of eddy near the coast of the south-eastern Baltic), *Vestnik Baltiiskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta*, 2012, Issue 1, pp. 16–21.
- Gurova E., Chubarenko B. Remote sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, Vol. 54, No. 4, pp. 631–654.
- Gurova E.S., Ivanov A.Yu. Osobennosti proiavleniia gidrodinamicheskikh struktur v yugo-vostochnoi chasti Baltiiskogo moria po dannym spektrometrov MODIS i sputnikovoi radiolokatsii (Peculiarities of manifestation of hydrodynamic structures in the south-eastern part of the Baltic Sea according spectroradiometer MODIS and radar imagery), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 4, pp. 41–54.
- Horstmann U. Distribution Patterns of Temperature and Water Colour in the Baltic Sea as recorded in Satellite Images: Indicators for Phytoplankton Growth. *Berichte Institute fur Meereskunde*, Kiel, 1983, Vol. 1, No. 106, 147 p.
- Karimova S.S., Lavrova O.Yu., Solovyev D.M. Nabljudenie vikhrevykh struktur Baltijskogo morja s pomoshchu radiolokatsionnykh i radiometricheskikh dannykh (Observation of vortical structures in the Baltic Sea by satellite radar and radiometer data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 5, pp. 1–9.
- Lavrova O.Yu. Sliki kak indikatory vikhrevoj aktivnosti v pribrezhnoj zone (Slicks as indicators of vortical activity in the coastal zone), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, pp. 118–123.
- Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. Kompleksnyj sputnikovyj monitoring morej Rossii (Integrated satellite monitoring of Russian seas), Moskva: IKI RAN, 2011, 470 p.
- Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G. Sputnikovye metody vyivleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moskva: IKI RAN, 2016, 335 p.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova N., Gade M. Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones, *Remote Sensing of the European Seas / V. Barale, M. Gade (Eds.)*, Springer Verlag, 2008, pp. 463–474.
- Oberg J. Cyanobacteria blooms in the Baltic Sea, HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets, 2016. URL: <http://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/cyanobacterial-blooms-in-the-baltic-sea/>.
- Shchuka T.A., Shchuka S.A. Dinamika kolichestvennykh kharakteristik chuzherodnykh vidov zooplanktona v yugo-vostochnoi chasti Baltiiskogo moria v iyule 2003–2015 gg. v sviazi s termohalinnymi uslovijami (Dynamics of quantitative characteristics of alien species of zooplankton in the south-eastern part of the Baltic Sea in July 2003–2015 in connection with thermohaline conditions), *PEMME*, 2016, Vol. XXVII, No. 1, pp. 86–108.
- Tavri A, Singha S, Lehner S, Topouzelis K. Observation of sub-mesoscale eddies over Baltic Sea using TERRASAR-X and oceanographic data. Proc. ‘Living Planet Symposium 2016’, Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016. (ESA SP-740, August 2016).

## К ТЕОРИИ СПЕКТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ

**В.П. Кузнецов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: vladkuz@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 21.11.2017, одобрена к печати 25.12.2017

В работе излагается метод спектральных решений эволюционных уравнений нелинейной акустики для сред с диссипацией. Приведены графики спектральных амплитуд и полевые формы волны, полученные суммированием большого числа гармоник для различных сред и параметров нелинейности.

**Ключевые слова:** нелинейность, волна, диссипация, число Рейнольдса

При описании и решении задач нелинейных волновых процессов можно использовать полевые или спектральные методы, выбор которых диктуется как целями исследования, так и свойствами среды. Считается (Гурбатов, Руденко и др., 2008), что спектральный метод эффективен лишь для сред с дисперсией при взаимодействии ограниченного числа гармоник, и поэтому при описании нелинейных волн в средах со слабой и сильной частотной дисперсией используются различные подходы (Гурбатов, Руденко, и др., 2008; Кузнецов, 2013, 2010).

Однако развитие спектральных методов позволяет сблизить возможности этих двух подходов. Формулы спектральных решений открывают возможность современными методами простых компьютерных программ суммирования большого числа гармоник, воспроизводить форму волны в любых средах и наблюдать эволюционную динамику нелинейной волны. В данной работе в развитие идей ранних работ (Кузнецов, 2013, 2010, 1970, 2013, 2011, 2009; Красильников, Кузнецов, 1974) предлагаются новый метод спектральных решений ряда эволюционных уравнений нелинейной акустики для сред с диссипацией. Заметим, что предлагаемый здесь метод может применяться и для сред с дисперсией и дифракцией при более сложном анализе комплексных величин в таких средах.

Рассмотрим класс квадратично-нелинейных эволюционных уравнений, которые могут быть решены в спектральном виде. В наиболее общем случае их можно представить в безразмерной форме

$$\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial \tau} = A_0 u + \sum_{n=1}^4 A_n \frac{\partial^n u}{\partial \tau^n} + \hat{M} \int u d\tau \equiv \hat{L}u. \quad (1)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $\hat{L}$  - линейные операторы, не зависящие от  $x$ , например, дифференцирование и интегрирование по  $\tau, y$ ;  $u(\tau, x, y, z)$  - функция, описывающая некоторую характеристику волны, например плотность, давление или потенциал скорости, нормированная на амплитуду источника сигнала. Все переменные и коэффициенты безразмерные здесь и далее во всех уравнениях.

В уравнении (1)  $A_0$  - коэффициент внешнего трения, создающегося при трении колеблющейся среды о неподвижную границу. К этому случаю относится действие стенок на волну в жидкости, заполняющий узкий капилляр, а также распространение звука в пористых материалах и в средах с релаксацией (Исакович, 1973; Хохлов, 1961; Руденко, Солуян, и др., 1974). Заметим, что при внешнем трении коэффициент затухания не зависит от частоты, т.е. волна любого вида распространяется в линейной среде без изменения формы. Коэффициенты  $A_n$  описывают диссипативные и дисперсионные процессы и относятся к уравнениям Бюргерса и Кортевега-де-Вриза (КдВ), помимо члена четвертого порядка, который описывает эффекты рассеяния волны на мелкомасштабных неоднородностях. Действительно коэффициент ослабления волны в неоднородной среде можно представить в виде  $\delta \approx k^2 a [1 - \exp(-k^2 a^2)]$  (Кузнецов, 2010; Чернов, 1975), где  $k, a$  - волновое число и масштаб неоднородностей. В случае мелкомасштабных неоднородностей получается релеевская зависимость - коэффициент рассеяния четвертой степени частоты. Для крупномасштабных флуктуаций коэффициент рассеяния растет пропорционально квадрату частоты, подобно коэффициенту вязкого трения. Таким образом, коэффициенты  $A_2$  и  $A_4$  могут учитывать также и эффекты ослабления волны за счет рассеяния.  $A_2$  - по сути обратное акустическое число Рейнольдса - отношение характерных «нелинейной» и «диссипативной» длин. Затем определим оператор  $\hat{M}$ . В самом простом случае (простом в смысле написания) это может быть постоянный коэффициент низкочастотной дисперсии в среде с резонансной кавитацией, а также в задачах с дифрагирующими пучками. Такое уравнение было получено и решено приближенно в спектральном виде, а также отображена форма волны суммой 50-ти гармоник в работе (Красильников, Кузнецов, 1974). Наиболее

важным случаем является включение в оператор  $\hat{M}$  поперечного лапласиана  $\Delta_{\perp}$ , приводящего к уравнению Хохлова-Заболотской (ХЗ). И наконец, для неоднородной среды к оператору  $\hat{L}$  можно добавить член с первой производной по времени и коэффициентом, зависящим от термодинамических неоднородностей среды (скорости звука) и компоненты скорости вихревого течения по направлению распространения звуковой волны (Кузнецов, 2010, 2009; Воронин, Кузнецов, и др., 2007).

Основой данного метода является возможность получения решения уравнения простой волны (ПВ) для идеальной среды в неявном виде  $u(x, \tau) = f(\tau - xu^k)$  или в спектральном виде для квадратичной и кубичной нелинейности, вычисляя временной спектр Фурье неявной функции соответственно (Кузнецов, 2013, 2010, 1970; Пелиновский, 1976)

$$u(\omega, x) = \frac{1}{i\omega x} \int_{-\infty}^{\infty} \{\exp[i\omega x u(\tau, 0)] - 1\} \exp(-i\omega \tau) d\tau, \quad (2)$$

$$u(\omega, x) = \int_{-\infty}^{\infty} du(\tau, 0) \exp[i\omega x u^2(\tau, 0)] \exp(-i\omega \tau), \quad (3)$$

где функция  $u(\tau, 0)$  определяется граничным условием. Заметим, что последние две формулы получены с использованием альтернативного метода разложения искомой функции в бесконечный ряд Тейлора по координате и затем полным суммированием его не применяя решения в неявном виде, как было получено в работе (Пелиновский, 1976), в которой рассмотрены свойства и эволюционные изменения различных форм и видов спектров простых волн в сложной нелинейной среде.

Ограничительной особенностью решений (ПВ) для идеальной среды является неоднозначность при  $|xf'| \geq 1$ . Физически, в точках неоднозначности в волне образуются ударные волны. Математически первые производные по  $x$  и  $\tau$  при этом условии обращаются в бесконечность  $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{uf'}{1 - xf'}$ , где  $u(0, \tau) = f(\tau)$  – профиль волны в источнике,  $f'$  – производная. Для граничного условия в виде гармонического источника, образование ударной волны будет происходить при  $x \geq 1$ , т.к.  $|f| \leq 1$ , а  $x$  – действительное число  $0 \leq x < \infty$ . Заметим, что при отсутствии диссипации и дисперсии расстояние  $x$  определяется только величиной нелинейности, в другом же случае, характеристики среды вязкость и др. введут свои ограничения на рост  $x$ .

Теперь перейдем к построению конкретных решений. Вначале рассмотрим задачи для сред с диссипацией. Такие задачи описываются следующим уравнением с тремя видами поглощения:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial \tau} = A_0 u + A_2 \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + A_4 \frac{\partial^4 u}{\partial \tau^4}, \quad (4)$$

где: коэффициенты  $A_n$  – безразмерные величины отношения характерной нелинейной длины к диссипативным, их знаки выбираются так чтобы волна затухала. В спектральном виде эти коэффициенты можно объединить и записать в виде:  $A(n) = A_0 - A_2 n^2 + A_4 n^4$ , где  $n = \omega/\omega_0$  для периодической функции,  $A(n)$  – действительная величина в случае с затуханием (в общем случае с дисперсией она будет комплексной).

Будем искать решение уравнения (4) в следующем виде  $u(x, \tau) = \exp(ax)p(x, \tau)$  с условием при  $x = 0$ ,  $p(0, \tau) = \sin \omega_0 \tau$ , ограничиваясь для простоты монохроматическим возмущением. Подставляя в (4) и преобразуя, получим

$$\frac{\partial p}{\partial x} + e^{ax} p \frac{\partial p}{\partial \tau} = -ap + A_0 p + A_2 \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} + A_4 \frac{\partial^4 p}{\partial \tau^4} \quad (5)$$

Будем искать частное решение при котором правая и левая часть уравнения (5) равняются нулю. Рассмотрим два следующих полученных таким образом уравнения. Первое нелинейное  $\frac{\partial p}{\partial x} + e^{ax} p \frac{\partial p}{\partial \tau} = 0$  с заменой пространственной координаты  $x \rightarrow s(x) = \int e^{-ax} dx$  сводится к уравнению простой волны, решением которого является неявная функция  $p(s, \tau) = f(\tau + sp)$  или в нашем частном случае  $p(s, \tau) = \sin \omega_0(\tau + sp)$ . Далее рассмотрим второе уравнение  $-ap + A_0 p + A_2 \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} + A_4 \frac{\partial^4 p}{\partial \tau^4} = 0$ , которое легко решается спектральным методом. Спектр простой волны и его производные для гармонического источника известны (Кузнецов, 2013, 2010, 1970; Пелиновский, 1976) и это уравнение переходит в алгебраическое  $(A_0 - A_2 n^2 + A_4 n^4 - a)P(s, n) = 0$  или в общем случае  $[a + A(n)]P(s, n) = 0$ , где  $P(s, n)$  спектр (ПВ), условие  $a + A(n) = 0$  является вторым обязательным для разделения уравнения (5).

Принимая  $a = -A(n)$ , получим  $\exp[-A(n)x]$  и новое уравнение (ПВ)  $\frac{\partial p}{\partial s} + p \frac{\partial p}{\partial \tau} = 0$  для функции  $p(s, \tau)$  с заменой пространственной координаты  $x \rightarrow s(x, n) = \int \exp[-A(n)x] dx$  или с учетом граничного условия



$s(x, n) = \{1 - \exp[-A(n)x]\} / A(n)$ . Таким образом, если  $P(s, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(s, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$  спектр функции  $p(s, \tau)$ , то и функция  $u(x, \tau)$  и её спектр  $U(x, \omega)$  будут определяться

$$u(x, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, \omega) e^{i\omega\tau} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(s, \omega) e^{-A(\omega)x + i\omega\tau} d\omega, \quad \text{или}$$

применяя свойство свертки получаем решение поставленной задачи в виде:

$$u(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} p(s, t) G(\tau - t) dt, \quad \text{где } G(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-A(\omega)x - i\omega t} d\omega. \quad (7)$$

И окончательно, безразмерный спектр нелинейной периодической волны в диссипативной среде может быть представлен в следующем виде для амплитуды гармоник

$$B_n(x) = \frac{\exp[-A(n)x]}{ins(x)} \int_{-\infty}^{\infty} [\exp(ins \sin \tau) - 1] \exp(-in\tau) d\tau, \quad ,$$

или в форме ряда Фурье

$$u(x, \tau) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp[-A(n)x] \frac{J_n(ns)}{ns} \sin(n\omega_0\tau), \quad (8)$$

где  $s(x) = [1 - \exp(-A(n)x)] / A(n)$   $A(n) = A_0 + A_2 n^2 + A_4 n^4$ ,  $n = \omega / \omega_0$ ,  $J_n(ns)$  – функция Бесселя 1-го рода.

Обобщая выше изложенный вывод можно отметить, что влияние диссипации для нелинейных волн приводит помимо линейного эффекта ослабления амплитуды каждой гармоники с различными коэффициентами к созданию новой приведенной координаты также для каждой гармоники, величина которой определяется функцией  $s(x, n)$ .

Проанализируем полученное решение. Очевидно, что при  $A(n)x \rightarrow 0$ ,  $s(x) \rightarrow x$ , и получаем спектр Бесселя-Фубини для идеальной среды, а при больших значениях  $A(n)x \rightarrow \infty$ ,  $s(x) \rightarrow 1 / A(n)$  отсутствует зависимость от  $x$ , т.е.  $s(x)$  стремится к постоянному значению, которое для уравнения Бюргера является акустическим числом Рейнольдса  $R = 1 / A_2$ .

Заметим, что нахождение значения функции  $s(x)$  для всех эволюционных уравнений (1), является центральным звеном получения спектральных решений нелинейной задачи, т.к. функция  $\exp[-A(n)x]$  есть просто спектральное решение линейного уравнения, а спектр (ПВ) давно известен. Впервые такая функция  $s(x)$  была получена Р.В. Хохловым для уравнения с коэффициентом «внешнего» трения не зависящем от частоты (Хохлов, 1961) и была им названа «безразмерным приведенным расстоянием»; мы будем придерживаться этого названия.

Далее перейдем к задачам для сред с разным типом затухания. Самая простая задача это распространение нелинейной волны в среде с частотно-

независимым поглощением или "внешнего" трения (Кузнецов, 2013, 2011, 2009, 2015). В этом случае  $s(x) = (1 - e^{-A_0 x}) / A_0$  определим расстояние образования разрыва  $s[x'(R_0)] = 1$  для этого случая  $x'(R_0) = -R_0 \ln(1 - 1/R_0)$ , где  $R_0 = 1/A_0$ . В дальнейшем индексы опустим, поскольку все коэффициенты по сути числа Рейнольдса только для разных характерных типов затухания. Влияние вязких сил приводит к тому, что при  $R \leq 1$   $x' \rightarrow \infty$  т.е. разрыв вообще не образуется, а при  $R \geq 1$  разрыв образуется не взирая на вязкость и  $x' \rightarrow 1$ . Амплитуды гармоник зависят от расстояния  $x$  и от процесса конкуренции нелинейного роста гармоник и вязкого уничтожения их, т.е. от числа  $R$

$$B_n(x, R) = 2 \exp(-x/R) \frac{J_n(ns)}{ns}, \quad s(x) = R[1 - \exp(-x/R)], \quad s(x) \leq 1.$$

Перейдем к другому процессу затухания – частотно-зависимому и будем анализировать спектральную картину для уравнения Бюргера. В этом случае задача несколько усложняется – поглощение волны и приведенное расстояние теперь зависят от частоты и конкуренция процессов нелинейности и затухания определяются величиной  $R/n^2$  в соответствии с полученным приведенным расстоянием  $s(x)$

$$B_n(x, R) = 2 \exp(-n^2 x/R) \frac{J_n(ns)}{ns}, \quad s(x) = R[1 - \exp(-n^2 x/R)], \quad s(x) \leq 1. \quad (9)$$

Теперь граница  $x'$  образования разрыва зависит не только от числа Рейнольдса  $R = 1/A_2$  но и различна для разных гармоник  $n$   $x' = -R \ln(1 - n^2/R) / n^2$ . Разрыв при  $(n^2/R) \geq 1$  не образуется, но достаточно условия  $R \leq 1$ , чтобы при любом целом  $n^2$  под логарифмом было отрицательное число и  $x' \rightarrow \infty$ , побеждает вязкость – опрокидывание волны не происходит нигде. В другом случае при  $(n^2/R) \leq 1$  разрыв образуется на расстоянии  $x'$ , и мы приходим к новому результату – появляется ограничение на число гармоник формирующих профиль волны –  $N_{\max} = \sqrt{R}$ . Это явление означает, что при  $R \gg 1$  спектр эффективно обрезается при возникновении ударной волны, определяя тем самым её безразмерную ширину  $\Delta \sim w_0 / w_n \sim 1/\sqrt{R}$ , или крутизну фронта, зависящую от соотношения нелинейных и диссипативных сил. Таким образом при  $R \gg 1$  наблюдается физически понятный результат – побеждает нелинейность и  $N_{\max} = \sqrt{R}$  можно интерпретировать как число степеней свободы нелинейной системы (Заславский, Сагдеев, 1988).

Далее, не трудно построить аналогичные решения для всех видов диссипации и не только её, т.к. общее решение (7) справедливо для всех отмеченных выше нелинейных эволюционных уравнений (1) поскольку их

линейное решение в спектральном виде не вызывает затруднений, а вычисление безразмерного приведенного расстояния  $s(x)$  требует специального анализа для каждой задачи. Приведем графики спектральных амплитуд  $B_n(x)$  (рис. 1) на расстояниях превышающих точку образования ударной волны и разные формы гармонической волны  $u(x, \tau)$  (рис. 2), полученные последовательным суммированием  $n + 2$  гармоник до 30-ти спектрального решения нелинейных уравнений (8) с различным типом поглощения на разных расстояниях от источника и уровнем конкуренции нелинейности и поглощения или обобщенных чисел Рейнольдса. Здесь хорошо прослеживается асимптотическое приближение к точному решению с увеличением числа просуммированных гармоник.

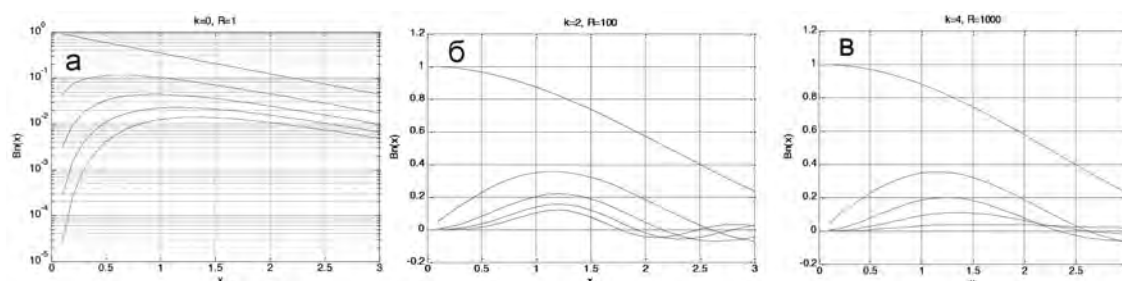


Рис. 1. Графики спектральных амплитуд 5-ти гармоник на расстояниях от источника  $x = 0$  до 3 и чисел Рейнольдса 1, 100, 1000 для различных типов поглощения: внешнее трение – а, уравнение Бюргера – б и четвертая степень – в.

Сделаем некоторое замечание. Как видно на рис. 2. в области крутого фронта волны наблюдаются небольшие колебания, которые в некоторых работах, посвященных численному моделированию сильно искаженных нелинейных сигналов (Аверьянов, Басова и др., 2005) авторы принимают за одновременное физическое действие конкурирующих процессов акустической нелинейности и сглаживающей диссипации. В действительности это объясняется особым поведением частичных сумм ряда Фурье в окрестности точки разрыва разлагаемой функции и хорошо известно в математике как явление Гиббса, что также наблюдается на графиках рис. 2 и является не физическим процессом, а чисто математической помехой. Это явление легко наблюдается простым суммированием ряда гармоник вида  $\sin(nt) / n$ .

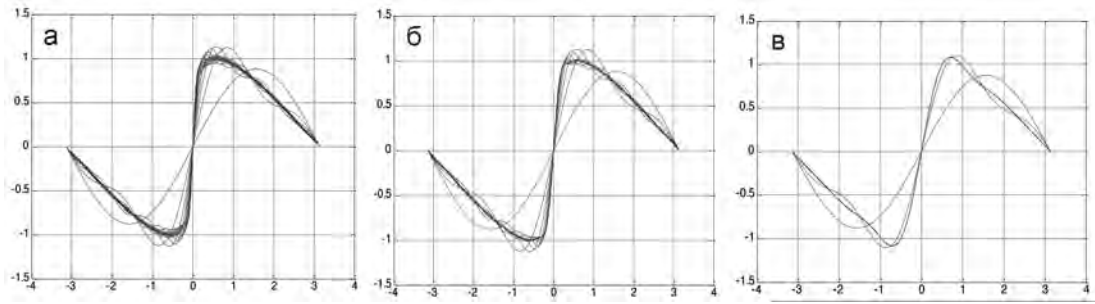


Рис. 2. Разные формы волны на расстоянии  $x = 1.0$  и числа Рейнольдса  $R = 1000$ , полученные последовательным суммированием  $n + 2$  гармоник от  $n = 1$  до 30 спектрального решения нелинейных уравнений с различным типом поглощения: внешнее трение – а, квадратичная зависимость уравнение Бюргерса – б и четвертая степень рассеяния – в.

Колебательные процессы в нелинейной волне возникают в средах с различной дисперсией скорости. В качестве примера колебательной эволюции нелинейной волны для уравнения Кортевега-де-Вриза на рис. 3 приведена форма гармонической волны в среде с дисперсией, полученная с помощью выше приведенного метода, однако из-за некоторых упрощений не претендующая на точное решение, но хорошо описывающая распространение нелинейной волны на ограниченных расстояниях от источника.

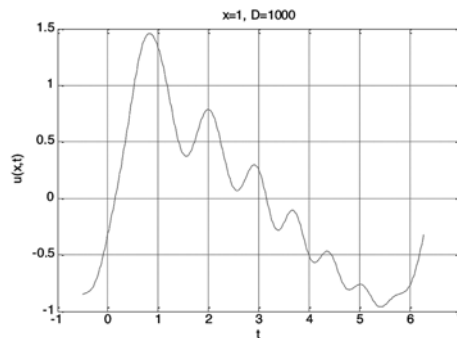


Рис. 3. Пример эволюции формы гармонической волны в среде с дисперсией (для уравнения КДВ) на расстоянии от источника  $x = 1.0$  и отношения дисперсионной и нелинейной длин  $D = 1000$  ( $1/A_3$ , аналогичное числу Рейнольдса) и модуля комплексного безразмерного расстояния

$$|s(x, n)| = 2 \left| \sin(n^3 A_3 x / 2) \right| / n^3 A_3 \leq 1.$$

В заключение получим точное решение для всего эволюционного интервала изменений  $x$ . Запишем неявное решение в параметрической форме:  $p(s, \tau) = \sin(z)$ ,  $\tau = z - s \sin(z)$ . При  $s \leq 1$  интервалу  $0 \leq z \leq \pi$  соответствует интервал  $0 \leq \tau \leq \pi$ , а при  $s \geq 1$  интервал изменений  $\tau$  становится больше  $\pi$ . Для устранения неоднозначности нужно ограничить изменения  $z$  от  $z_0$  до  $\pi$ , где  $z_0$  есть точка пересечения кривой  $z = f(\tau, s)$  с осью ординат или второй корень

уравнения  $\tau = z - s \sin(z)$ . Это условие соответствует условию равенства площадей, ограниченных волновой функцией, введенного Л.Д. Ландау. Теперь определим коэффициенты ряда Фурье разрывной функции  $p(s, \tau)$  при  $s \geq 1$

$$B_n(s) = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi p(s, \tau) \sin(n\omega_0 \tau) d\tau, \text{ выполняя замену переменных в определенном}$$

интеграле и пределах интегрирования и дважды интегрируя по частям, получим выражения для амплитуд гармоник через неполные цилиндрические функции  $J_n(ns, z_0)$  (Кузнецов, 2010, 1970).

$$B_n(s) = \frac{2}{n\pi s} \left[ z_0 + \int_{z_0}^\pi \cos n(s \sin z - z) dz \right] = \frac{2}{n\pi s} [z_0 + \pi J_n(ns, z_0)] \quad (10)$$

Таким образом снимается вопрос о математическом разрыве и эволюцию нелинейной волны можно рассматривать в спектральной форме на всем интервале изменений расстояния или времени в зависимости от типа задачи. Анализ выражения (10) показывает, что при  $s \gg 1$   $z_0 \rightarrow \pi$  и амплитуда гармоник  $B_n \approx 2/ns$ . На рис. 4 приведен график спектральных амплитуд 8-ми гармоник простой волны в среде без диссипации на расстояниях до 10-ти приведенных масштабов, вычисленных по формуле (10).

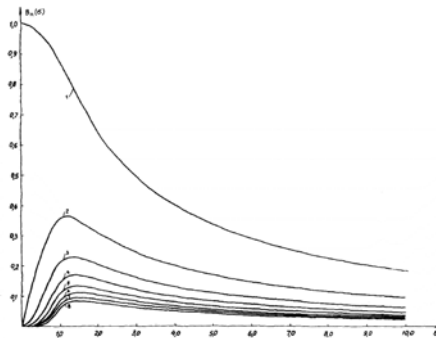


Рис. 4. График спектральных амплитуд 8-ми гармоник на всем интервале изменений пространства для простой волны Римана в недиссипативной среде, представленных через неполные цилиндрические функции по формуле (10) (Кузнецов, 2010).

Очевидно, что данное уточнение справедливо не только для простой волны Римана, но и для всех сред, где наблюдаются разрывные решения.

### Литература

Аверьянов М.В., Басова М.С., Хохлова В.А. Стационарные и квазистационарные волны в диссипативных системах четного порядка // Акуст. журн. 2005. Т. 51. №5. С. 581–588.



В.П. Кузнецов

- Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. 448 с.
- Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И.* Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. Приложения к нелинейной акустике. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
- Заславский Г.М., Сагдеев Р.З.* Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука. ГРФМЛ, 1988. 368 с.
- Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.
- Красильников В.А., Кузнецов В.П.* Распространение нелинейных звуковых волн в жидкости при кавитации. // Акуст. журн. 1974. Т. 20. С. 473–477.
- Кузнецов В.П.* Нелинейная акустика в океанологии // Акустика океана. Сб. трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. – М.: ГЕОС, 2009. С. 280–283.
- Кузнецов В.П.* Нелинейная акустика в океанологии. М.: Физматлит, 2010. 263 с.
- Кузнецов В.П.* методах решения уравнений нелинейной акустики. Сб. трудов XXIV сессии РАО. – Саратов, 2011. Т. 1. С. 107–112.
- Кузнецов В.П.* О спектральных методах решения уравнений нелинейной акустики. // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 3. С. 322–326.
- Кузнецов В.П.* О спектрах интенсивных шумов. // Акуст. журн. 1970. Т. 16. № 1. С. 155–156.
- Кузнецов В.П.* Спектры нелинейных волн в диссипативных средах // Акустика океана. Сб. трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. – М.: ГЕОС, 2013. С. 199–202.
- Кузнецов В.П.* Спектры нелинейных волн в диссипативных средах. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20–24 августа 2015 года. С. 2137–2139.
- Пелиновский Е.Н.* Спектральный анализ простых волн. Изв. ВУЗ Радиофизика. 1976. Т. 19. № 3. С. 373–383.
- Руденко О.В., Солюян С.И., Хохлов Р.В.* Проблемы теории нелинейной акустики // Акуст. журн. 1974. Т. 20. № 3. С. 449–457.
- Хохлов Р.В.* К теории ударных радиоволн в нелинейных линиях // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6. № 6. С. 917–925.
- Чернов Л.А.* Волны в случайно-неоднородных средах. М.: Наука, 1975. 172 с.

## TO THE THEORY OF SPECTRA OF NONLINEAR WAVES IN DISSIPATIVE MEDIA

V.P. Kuznetsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [vladkuz@ocean.ru](mailto:vladkuz@ocean.ru)*

Submitted 21.11.2017, accepted 25.12.2017

In this paper present a spectral method for solutions of evolution equations of nonlinear acoustics for environments with dissipation. Graphs of the spectral amplitudes and the field waveform obtained by the summation of a large number of harmonics for various environments and parameters of nonlinearity are given.

**Keywords:** non-linearity, wave, dissipation, Reynolds number

## References

- Averiyanov M.V., Basova M.S., Khokhlova V.A., Stationary and quasi-stationary waves in even-order dissipative systems, *Acoustical Physics*, 2005, Vol. 51, No. 5, pp. 495–501.
- Chernov L.A., Volny v sluchajno-neodnorodnyh sredah, Moskva: Nauka, 1975, 172 p.
- Gurbatov S.N., Rudenko O.V., Saichev A.I., Volny i struktury v nelinejnyh sredah bez dispersii, Prilozhenija k nelinejnoj akustike, Moskva: Fizmatlit, 2008, 496 p.
- Hohlov R.V., K teorii udarnyh radiovoln v nelinejnyh linijah, *Radiotekhnika i jelektronika*, 1961, Vol. 6, No. 6, pp. 917–925.
- Isakovich M.A., Obshhaja akustika, Moskva: Nauka, 1973, 495 p.
- Krasil'nikov V.A., Kuznetsov V.P., Rasprostranenie nelinejnyh zvukovyh voln v zhidkosti pri kavitacii, *Akust. zhurn.*, 1974, Vol. 20, pp. 473–477.
- Kuznetsov V.P., Nelinejnaja akustika v okeanologii, Akustika okeana, Sb. trudov shkoly-seminara akad. L.M. Brehovskih, Moskva: GEOS, 2009, p. 280–283.
- Kuznetsov V.P., Nelinejnaja akustika v okeanologii, Moskva: Fizmatlit, 2010, 263 p.
- Kuznetsov V.P., O metodah reshenija uravnenij nelinejnoj akustiki, Sb. trudov XXIV sessii RAO, Saratov, 2011, Vol. 1, p. 107–112.
- Kuznetsov V.P., O spektrah intensivnyh шумов, *Akust. zhurn.*, 1970, Vol. 16, No. 1, pp. 155–156.
- Kuznetsov V.P., On Spectral Methods for Solving Nonlinear Acoustics Equations, *Acoustical Physics*, 2013, Vol. 59, No. 3, pp. 281–285.
- Kuznetsov V.P., Spektry nelinejnyh voln v dissipativnyh sredah, Akustika okeana, Sb. trudov shkoly-seminara akad. L.M. Brehovskih, Moskva: GEOS, 2013, pp. 199–202.
- Kuznetsov V.P., Spektry nelinejnyh voln v dissipativnyh sredah, XI Vserossijskij s'ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoj i prikladnoj mehaniki, Kazan', 20–24 avgusta 2015 goda, pp. 2137–2139.
- Pelinovskij E.N., Spektral'nyj analiz prostyh voln, *Izvestia VUZ Radiofizika*, 1976, Vol. 19, No. 3, pp. 373–383.
- Rudenko O.V., Solujan S.I., Hohlov R.V., Problemy teorii nelinejnoj akustiki, *Akust. zhurn.*, 1974, Vol. 20, No. 3, pp. 449–457.
- Voronin V.A., Kuznecov V.P., Mordvinov B.G., Tarasov S.P., Timoshenko V.I., Nelinejnye i parametricheskie processy v akustike okeana, Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2007, 448 p.
- Zaslavskij G.M., Sagdeev R.Z., Vvedenie v nelinejnuju fiziku: Ot majatnika do turbulentnosti i haosa, Moskva: Nauka, GRFML, 1988, 368 p.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ВОД НАД КОНТИНЕНТАЛЬНЫМ СКЛОНОМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

А.Ю. Лазарюк<sup>1</sup>, Д.Д. Каплуненко<sup>1</sup>, А.Г. Островский<sup>2</sup>, В.Б. Лобанов<sup>1</sup>,  
О.О. Трусенкова<sup>1</sup>, С.Ю. Ладыченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041,  
г. Владивосток, Балтийская, 43 e-mail: [lazaryuk@poi.dvo.ru](mailto:lazaryuk@poi.dvo.ru)*

<sup>2</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36 e-mail: [osasha@ocean.ru](mailto:osasha@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 10.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017

В 2015 г. были впервые проведены длительные (в течение полугода) непрерывные измерения термохалинной структуры вод над континентальным склоном северо-западной части Японского моря. Измерения проводились с помощью модуля SBE 52-MP STD, установленного на автономном профилографе Аквалог на притопленной заякоренной буйковой станции к востоку от залива Петра Великого в теплую часть года с 18 апреля по 15 октября. В статье представлен подход к первичной обработке данных STD-измерений океанологического профилирующего аппарата, включая специально разработанную программу обработки STDdata\_cor\_SBE\_52-MP. Данные SBE 52-MP STD верифицированы с помощью измерений на станциях судового разреза НИС «Академик М.А. Лаврентьев», выполненного 30 мая поперек склона и пересекшего место установки Аквалога. Вертикальные профили температуры и солености по судовым измерениям и данным профилографа Аквалог хорошо согласуются, демонстрируя особенности изменения температуры, солености и вертикальной плотностной стратификации при прохождении мезомасштабного антициклонического вихря, перемещавшегося на юго-запад в области Приморского течения. Верификация измерений модулем SBE 52-MP STD по данным судовых зондирований SBE-911plus позволила устранить также и систематические компоненты погрешностей. В результате, качественные показатели гидрофизической информации, полученной профилографом Аквалог, удалось привести к стандартам WOCE. Для исследования вихря дополнительно были использованы спутниковые снимки температуры поверхности моря, полученные с помощью радиометра AVHRR ИСЗ NOAA. Пример анализа структуры синоптического вихря показывает перспективность подхода к экспериментальным гидрофизическим исследованиям, сочетающего использование длительных временных рядов наблюдений в толще вод наряду с судовыми разрезами и съемками акватории из космоса с помощью мультиспектральной аппаратуры в целях развития 4-х мерной океанографии.

**Ключевые слова:** заякоренный мобильный профилирующий аппарат, STD-зонд, T,S – зондирования, инфракрасные спутниковые изображения морской поверхности, Японское море, Приморское течение, вертикальная термохалинная структура вод, синоптический вихрь, 4-х мерная океанография.

## Введение

Характерной особенностью акватории северо-западной части Японского моря является узкий шельф и крутые, до  $10^{-1}$ , уклоны рельефа дна. По северной и западной периферии циклонических круговоротов в субарктической части моря наблюдаются холодные пограничные течения, которые следуют на юго-запад вдоль материкового склона. Звено этой циркуляционной системы между  $42^{\circ}$  и  $48^{\circ}$  с.ш. называется Приморским течением (Юрасов, Яричин, 1991). Неустойчивость пограничных течений приводит к образованию синоптических вихрей, перемещающихся вдоль континентального склона. Такие вихри, неоднократно наблюдались как на спутниковых инфракрасных (ИК) изображениях непосредственно в зоне Приморского течения (Гинзбург и др., 1998; Ладыченко, 2002; Ладыченко, Лобанов, 2013; Лобанов и др., 2007; Никитин, Юрасов, 2008; Пономарев и др., 2011; Юрасов и др., 2009). Вихревая динамика усиливает водообмен шельфа и глубокого моря, интенсифицируя процессы первичного продуцирования (Звалинский и др., 2006) и оказывая влияние на поведение морских организмов (Жадан и др., 2013).

Сведения о вертикальной структуре вихрей и инициируемых ими процессах перемешивания вод в северо-западной части Японского моря пока еще фрагментарны ввиду ограниченности и нерегулярности контактных измерений в толще вод, которые в этом районе до сих пор выполнялись научно-исследовательскими судами (НИС). Требуемую длительность и регулярность таких исследований способны обеспечить автономные океанологические приборы. Однако, дрейфующие буи PALACE (проект ARGO) оказались недостаточно эффективными для исследования структуры вод в районах континентального склона. Поэтому было логично воспользоваться успешным опытом применения заякоренного автономного профилирующего аппарата (далее профилограф) Аквалог (Островский и др., 2013). Притопленная буйковая станция с профилографом была установлена на континентальном склоне на изобате 440 м в районе к востоку от залива Петра Великого с апреля по октябрь 2015 г. Измерения гидрофизических параметров производились штатным для профилографа модулем SBE 52-MP (Moored Profiler) CTD.

Заякоренный мобильный профилирующий аппарат Аквалог (Островский и др., 2013) позволяет регулярно получать вертикальные профили гидрофизических параметров, включая температуру и соленость воды. При этом решена задача однородности измерений, что применительно к профилированию водной толщи означает выборку заданных параметров с определенной точностью и равномерной дискретностью по вертикали. Регулярно собранные данные позволяют обеспечить статистическое оценивание с высокой точностью, их легче усваивать на этапе специализации в численных моделях динамики океана. В 2010–2016 гг. профилограф Аквалог был использован для научных исследований в Балтийском, Карском, Красном, Мертвом, Средиземном и Черном морях (Островский, 2017). Однако, до сих пор не были детально исследованы особенности применения CTD-зондов в составе профилографов Аквалог, отсутствуют также отлаженные методики обработки соответствующих данных измерений тонкой термохалинной структуры водной толщи.

В настоящей работе выполнены оценки погрешностей полученных данных натуральных измерений термохалинных параметров в Японском море, описана схема первичной обработки, которая позволила уменьшить уровни погрешностей. Повышению качества гидрофизических данных профилографа также способствовала их верификация по результатам судовых СТД-зондирований. Полученный таким образом уникальный массив натуральных данных позволил выявить многочисленные неоднородности морской среды с масштабами от нескольких дней до нескольких недель. Вертикальная структура синоптического вихря, прошедшего в районе заякоренной станции в конце мая 2015 г., была проанализирована по фрагменту этого массива с использованием данных спутниковых наблюдений в ИК-диапазоне электромагнитного спектра.

### 1. Данные и методы

Профилограф Аквалог представляет собой подвижную платформу, снабженную океанологическими датчиками, которая устанавливается на заякоренной станции для вертикального зондирования морской среды (Островский и др., 2013). Он автоматически перемещается по тросу, натянутому вертикально между подповерхностной плавучестью и донным якорем, обеспечивая периодические измерения в толще вод в течение длительного времени.

Заякоренная автономная станция Аквалог была установлена в районе континентального склона Приморья в точке с координатами:  $42.53^{\circ}$  с.ш.,  $133.80^{\circ}$  в.д, где глубина места достигала 440 м (рис. 1а). Профилирование водного слоя производилось каждые 6 часов с 18 апреля по 15 октября 2015 г. в двух режимах: в течение пяти суток между горизонтами 65 и примерно 300 м, а на следующие, шестые сутки до глубины 420 м.

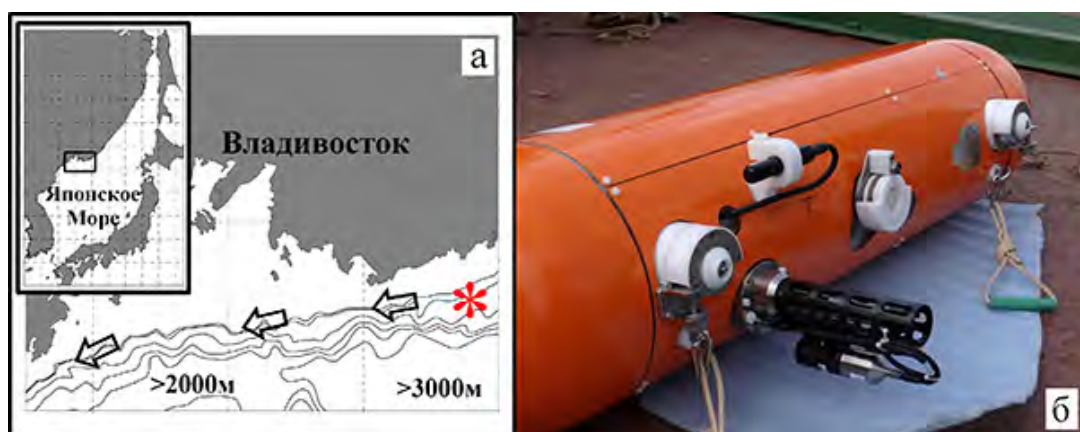


Рис. 1. Рельеф дна в районе исследования (а), изобаты 100, 200, 500, 1000, 2000 и 3000 м; стрелками обозначено Приморское течение, звездочкой – место постановки заякоренной автономной станции. На врезке – Японское море, прямоугольником выделен район исследования. Профилограф Аквалог со встроенным модулем SBE 52-MP CTD (б) на палубе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» перед установкой в Японском море в апреле 2015 г.



Температура морской воды, её электропроводность, содержание растворённого в воде кислорода и давление измерялись с частотой 1 Гц модулем SBE 52-MP CTD (далее СТД-зонд, рис. 1б), который специально предназначен для измерений с подвижных платформ. Его чувствительные элементы: ячейка проводимости SBE 4 и датчик кислорода SBE 43F соединены с помпой SBE 5 (канал прокачки), а термометр SBE 3 установлен вне этого канала, рядом с входным отверстием SBE 4 (<http://www.seabird.com>). Модуль SBE 52-MP CTD располагался горизонтально внутри корпуса верхней части профилографа Аквалог, за исключением входного отверстия SBE 4 и термометра SBE 3, которые выступали за пределы этого корпуса.

Профилограф Аквалог удерживался на максимальной глубине в начале и по завершению каждого цикла движения. Регистрация данных осуществлялась на всех этапах движения носителя, т.е. при его перемещениях, как вверх, так и вниз. Скорость профилирования в обоих направлениях составляла около 0.2 м/с.

## 2. Погрешности и первичная обработка СТД данных

Данные, измеренные модулем SBE 52-MP CTD, получены в условиях натурального эксперимента и содержат погрешности: инструментальные и методические. Первые зависят от метрологических характеристик используемых датчиков и стратификации исследуемой водной толщи, а вторые – от условий проведения натурального эксперимента. Кроме того, инструментальные погрешности принято разделять на три компонента: систематические, случайные и динамические (Архипкин и др., 2009).

Корректный анализ измеренных данных требует оценки и учёта возможных уровней погрешностей, а также предварительной, первичной обработки исходных массивов данных, позволяющей понизить вклад погрешностей до минимального уровня (UNESCO, 1988).

Модуль SBE 52-MP CTD, входящий в состав профилографа, был произведён в сентябре 2014 г. и калибровки его датчиков соответствуют указанному сроку. До момента постановки станции этот модуль не эксплуатировался. Фирма-изготовитель Sea-Bird Electronics Inc. (США) гарантирует измерение параметров морской воды согласно характеристикам SBE 52-MP CTD, указанным в Таблице 1 (<http://www.seabird.com>). Величины этих характеристик определены на лабораторных стендах, т.е. соответствуют идеальным условиям (Архипкин и др., 2009).

Таблица 1. Основные характеристики SBE 52-MP CTD

Метрологические характеристики	Электропроводность, мСм·см <sup>-1</sup>	Температура, °С	Давление, дбар	Кислород, мкмоль/кг
Сенсор	SBE 4	SBE 3		SBE 43F
Диапазон	0 ÷ 90	-5 ÷ +35	до 1000	до 460
Точность	0.003	0.002	1	7
Дрейф/месяц	0.003	0.0002	0.05	1.6
Разрешение	0.0005	0.0001	0.02	0.15

Предварительный анализ массива STD данных зонда SBE 52-MP показал узкие диапазоны изменчивости измеренных параметров водной среды:  $65 \div 430$  дбар,  $5.5 \div 0.7^\circ\text{C}$ ,  $32.5 \div 29.1$  мСм/см и  $430 \div 260$  мкмоль/кг. Следовательно, учитывая узость диапазонов и заявленные границы метрологических характеристик (точность и дрейф), оцениваем систематическую компоненту инструментальной погрешности измеренных значений температуры пределами  $\pm 0.003^\circ\text{C}$ , электропроводности  $\pm 0.010$  мСм/см, давления  $\pm 2$  дбар и растворённого кислорода  $\pm 10$  мкмоль/кг.

Приборы фирмы SBE отличаются минимальными уровнями шума измерительных каналов (Архипкин и др., 2009). Оценки уровня случайных компонент инструментальных погрешностей для аналогичных профилирующих комплексов, как правило, не превышают 3-х величин параметра «разрешение» (Лазарюк, 2009), т.е. соответствуют:  $0.0005^\circ\text{C}$ ,  $0.001$  мСм/см,  $0.05$  дбар и  $0.4$  мкмоль/кг.

Наибольший разброс в оценках уровней инструментальных погрешностей измеренных величин электропроводности  $C_m$ , температуры  $T_m$  и растворённого в воде кислорода  $O_m$ , приходится на динамические компоненты, которые зависят от стратификации слоя морской воды, инерционности соответствующего датчика и режима движения измерительного комплекса (Лазарюк, 2009).

Влияние инерционных эффектов на измеренную величину  $X_m(t)$  обобщённого параметра  $X_r(t)$  в момент времени  $t$  при наличии стратификации ( $X_r(t) \neq \text{const}$ ) в исследуемом слое морской воды и в отсутствии систематических и случайных погрешностей принято описывать дифференциальным уравнением 1-го порядка:

$$X_r(t) = X_m(t) + R_x(t) \cdot X_m'(t), \quad (1)$$

где  $X_m'(t)$  – производная. Величину коэффициента  $R_x(t)$  определяют конструкция датчика, свойства материала его чувствительного элемента и характеристики омывающего потока морской воды.

Инерционность ячейки SBE 4, трёхэлектродной капиллярной трубки длиной 19 см, сопряжённой с насосом SBE 5, оценивается константой  $R_c(t) \approx 0.06$  с. Инерционность стандартного термометра SBE 3, как правило, не превышает  $R_r(t) \leq 0.5$  с. А величина инерционного коэффициента кислородного датчика SBE 43F, который располагался непосредственно между ячейкой и насосом, варьирует как  $2 \leq R_o(t) \leq 5$  с в зависимости от температуры окружающей среды (<http://www.seabird.com>). Однако данные ячейки, измеренные в стратифицированных по температуре слоях, могут содержать дополнительную погрешность, вызванную тепловым контактом корпуса SBE 4 (массивной стеклянной трубки) с измеряемой порцией морской воды (эффект именуемый Cell Thermal Mass, <http://www.seabird.com>).

Решение задачи Коши уравнения (1) при условии  $X_r(0) = X_m(0)$  в начальный момент времени  $t = 0$  и постоянстве скорости перемещения зонда,  $V(t) = \text{const}$ , имеет вид:

$$X_m(t) = X_m(t - \delta t) \cdot \exp[-\delta t / R_x] + X_r(t) \cdot \{1 - \exp[-\delta t / R_x]\}, \quad (2)$$

где  $\delta t$  – интервал регистрации данных. Согласно выражению (2) процесс измерения подобен экспоненциальной фильтрации, т.е. исходное распределение  $X_r(t)$  подвергается сглаживанию с характерным смещением его локальных неоднородностей на величину, приблизительно, равную инерционному коэффициенту  $R_x$  (Архипкин и др., 2009).

Непосредственно в структурах профилей измеренных параметров практически не заметны изменения, обусловленные динамическими погрешностями. Однако, из-за неравенства инерционных коэффициентов  $R_r(t) > R_c(t)$ , при расчёте профилей солёности  $S_m(t)$  и плотности  $\rho_m(t)$  по температуре  $T_m(t)$  и электропроводности  $C_m(t)$  в слоях температурного градиента возникают ложные аномалии (Лазарюк, 2009).

Для понижения уровней погрешностей, а также устранения иных эффектов, ухудшающих качество полученной информации, фирма SBE рекомендует выполнять первичную обработку данных программой SBE-Data Processing (<http://www.seabird.com>). В частности, процедурой Filter уменьшается динамическая рассогласованность между измеренными величинами температуры и электропроводности. Её алгоритм соответствует схеме экспоненциального фильтра (2) и применяется, преимущественно, для сглаживания профиля электропроводности, измеренного с меньшей инерционностью:

$$C_s(t) = C_s(t-\delta t) \cdot \exp[-\delta t/R_s] + C_m(t) \cdot \{1 - \exp[-\delta t/R_s]\}. \quad (3)$$

Величину параметра  $R_s$  предлагается устанавливать экспертным методом.

Дополнительные погрешности данных ячейки SBE 4, вызванные эффектом Cell Thermal Mass, минимизируются с помощью одноимённой процедуры, которая при размерности измеренной электропроводности (мСм/см) соответствует схеме:

$$C_{sc}(t) = C_s(t) + A_c(t) \cdot 10, \quad (4)$$

$$A_c(t) = a_1 \cdot [T_m(t) - T_m(t-\delta t)] \cdot \{1 + 0.006 \cdot [T_m(t) - 20]\} / 10 - b_1 \cdot A_c(t-\delta t), \quad (5)$$

$$a_1 = 2a / [b + 2], \quad (6)$$

$$b_1 = 1 - 2a_1/a. \quad (7)$$

Значения коэффициентов  $\{a; b\}$  в выражениях (6, 7) индивидуальны для каждой модели фирмы SBE. Например, для зондов серии SBE 19plus рекомендовано использовать  $\{0.04; 1/8\}$ . Однако их величины для ячейки SBE 4 отсутствуют в описании модуля SBE 52-MP CTD.

Инерционный эффект в данных датчика SBE 43F проявляется смещением локальных неоднородностей на профилях  $O_m(t)$  относительно исходного распределения  $O_r(t)$ :

$$O_r(t) \approx O_m(t + Dt), \quad (8)$$

и устраняется процедурой Aling. Величину параметра смещения  $Dt \approx n \cdot \delta t$ , где  $n = 0, 1, \dots$ , предлагается оценить с точностью  $\pm \delta t$  из анализа данных, измеренных на спуске и при подъёме прибора (<http://www.seabird.com>).

Принимая во внимание эти соображения, мы отказались от программы SBE-Data Processing и воспользовались разработанным в ТОИ ДВО РАН программным продуктом CTDdata\_cor (Лазарюк, 2010), который мы адаптировали для массива исходных данных SBE 52-MP CTD (программа CTDdata\_cor\_SBE\_52-MP). Таким образом, в процессе первичной обработки каждой пары  $\{C_m(t); T_m(t)\}$  величина параметра  $R_s$  фильтра (3) подбиралась в пределах от 0 до 2 по критерию минимума абсолютного значения суммы отрицательных величин производной по глубине потенциальной плотности  $\rho_\theta(z) = \rho(S, \theta, P)$ . Коэффициенты  $\{a; b\}$  (6, 7) определялись методом наименьших квадратов при сопоставлении парных профилей солёности, рассчитанных на спуске и при подъёме профилографа. Аналогичным методом устанавливался параметр смещения  $Dt$  (8) при коррекции распределения растворённого в воде кислорода  $O_m(t)$ . На завершающем этапе обработки устранялся шум в структурах рассчитанной солёности  $S(t)$  и формировались ряды откорректированных данных с заданным шагом по глубине. Расчётные характеристики водной среды: солёность, плотность, потенциальная температура и глубина, - определялась по общепринятым формулам (Fofonoff, Millard, 1983).

### 3. Результаты первичной обработки данных STD-зонда SBE 52-MP

Исходный массив данных SBE 52-M CTD, полученный с частотой 1 Гц при подъёме и спуске профилографа Аквалог с 18 апреля по 15 октября 2015 г., содержит 718 парных серий зондирований между горизонтами 65 и 300 (420) м и, дополнительно, 117 одиночных, выполненных на подъёме и охватывающих слой 420-300 м.

Первичная обработка данных программой CTDdata\_cor\_SBE\_52-MP показала, что устранение рассогласованности измеренных профилей  $T_m(t)$  и  $C_m(t)$  с использованием экспоненциального фильтра (3) в 90% случаев не привело к заметному изменению уровня динамической погрешности рассчитанной солёности  $S_s(t)$ . Оптимальные величины параметра  $R_s$ , установленные с шагом 0.05 с, варьировали в пределах от 0.2 до 0.5 с (рис. 2). Это обусловлено отсутствием в данных градиентных прослоек со значительными перепадами температуры, поскольку в течение

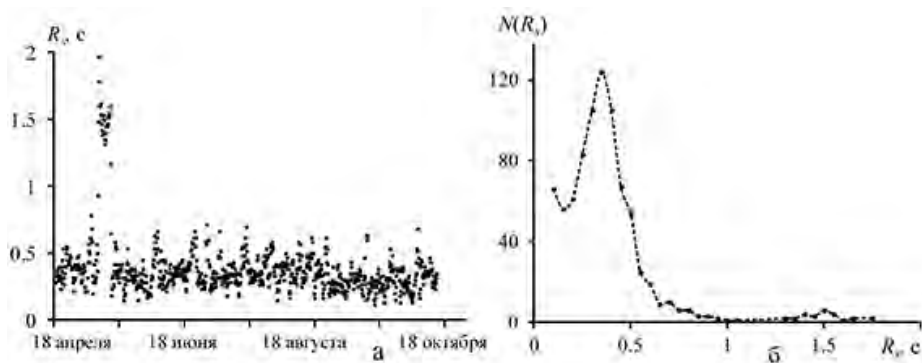


Рис. 2. (а) – оптимальные величины параметра  $R_s(n)$ , полученные в процессе коррекции экспоненциальным фильтром (3) профилей электропроводности, измеренных SBE 52-MP STD на траекториях подъёма профилографа Аквалог с 18 апреля по 15 октября 2015 г.; (б) – повторяемость  $N$  параметра экспоненциальной коррекции  $R_s(n)$ .

периода наблюдений слой сезонного термоклина располагался выше 60 м, а также наличием методических погрешностей, вызванных турбулентными перемещениями порций морской воды в пограничном слое корпуса профилографа Аквалог. Тем не менее, в 10% случаев динамические погрешности в данных  $S_s(t)$  удалось заметно понизить. Эти случаи, в основном, соответствуют периоду с 6 по 11 мая 2015 г., когда по неустановленной причине измерения температуры происходили с увеличенной инерционностью, и согласование профилей  $T_m(t)$  и  $C_m(t)$  было выполнено при значениях коэффициента  $0.8 \leq R_s \leq 2$  с (рис. 2а).

Погрешности данных ячейки проводимости, обусловленные эффектом Cell Thermal Mass, устранялись по схеме (4-7). При величинах коэффициентов  $\{a; b\} = \{0.10; 1/13\}$  удалось достичь приемлемого уровня среднеквадратичной оценки разности значений солёности, полученных на спуске и подъёме,  $D|S_{up}(t) - S_{down}(t)| < 0.001$  епс (единица практической солёности).

На рис. 3 представлены данные SBE 52-MP CTD от 20 апреля 2015 г. Профили температуры, измеренные на подъёме и спуске, имеют минимальные отличия (рис. 3а). В то же время, на профилях солёности (рис. 3б), рассчитанных до коррекции профилей электропроводности, имеются значительные расхождения ( $|S_{up}(t) - S_{down}(t)| \leq 0.03$  епс) в слоях, характеризующихся температурными градиентами. В результате последующей коррекции данных программой CTDdata\_cor\_SBE\_52-MP эти расхождения уменьшены в несколько раз (рис. 3в).

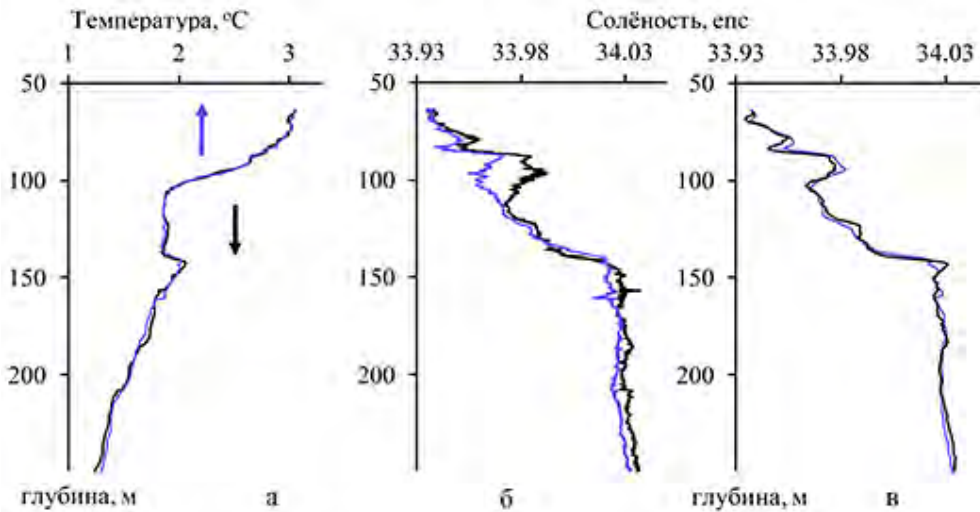


Рис. 3. Профили температуры (а) и солёности (б, в) исследуемой водной массы по данным измерений SBE 52-MP CTD на спуске и подъёме профилографа в 18:00-18:50 20 апреля 2015 г., причем на рисунках (б) и (в) показаны профили солёности, рассчитанные соответственно до и после первичной обработки данных.

В большинстве случаев проявления инерционного эффекта в данных датчика кислорода SBE 43F удавалось ослабить процедурой смещения (8) профиля  $O_m(t)$  при  $Dt=2$  сек. Высокочастотные вариации на профилях рассчитанной солёности  $S(t)$  устранялись прямоугольным фильтром при ширине окна 7 сек (1.3–1.4 м). Формирование массива откорректированных данных осуществлялось с шагом по глубине 1 м.



#### 4. Верификация гидрологических данных профилографа Аквалог

Судовые измерения были использованы для верификации данных профилографа Аквалог. Океанологический разрез, пересекающий место установки профилографа Аквалог, был выполнен 30 мая 2015 г. с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (рейс № 69). Гидрологические измерения производились зондирующим комплексом SBE-911plus, подводный блок которого состоял из зонда SBE 9plus, пробоотборника SBE 32 и батометров Нискина объёмом 5 литров. SBE 9plus включал: встроенный в корпус зонда датчик давления типа Digiquartz с температурной компенсацией, два комплекта датчиков для измерения температуры SBE 3plus и электропроводности SBE 4C, снабжённых помпами SBE 5T, и оптический датчик кислорода Rinko III (JFE Advantech Co., Ltd., Япония). Измеряемые параметры регистрировались бортовым блоком SBE-11plus с частотой 24 Гц, средняя скорость зондирования не превышала 1 м/с.

Оба комплекта SBE 3plus + SBE 4C зонда SBE-9plus имели калибровочные сертификаты, датированные августом 2014 г. Дополнительно их показания были откорректированы по результатам специального эксперимента с более «свежим» (январь 2015 г.) аналогичным комплектом Сеульского университета (Республика Корея). Интеркалибровка комплектов (одновременное их использование при зондированиях SBE-9plus) была выполнена в предыдущем международном этапе экспедиции на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (апрель 2015 г.). Расхождения между показаниями датчиков температуры SBE 3plus трёх комплектов, задействованных в эксперименте, не превышали 0.001°C, т.е. находились в пределах заявленной точности. Сравнение данных ячеек проводимости показало минимальный разброс (менее 0.0005 мСм/см) между комплектом Сеульского университета и SBE 4C одного из двух комплектов ТОИ ДВО РАН. В дальнейшем, именно данные этого комплекта использовались на этапах первичной обработки и верификации данных SBE 52-MP CTD.

Показания датчика кислорода Rinko III также были предварительно откорректированы по результатам их сравнения с данными лабораторного определения концентраций кислорода (метод Винклера) в пробах воды, отобранных с помощью пробоотборника SBE 32. После коррекции данных Rinko III их расхождения с величинами, установленными методом Винклера, не превышали  $\pm 3$  мкмоль/кг.

Сопоставление данных SBE-911plus, измеренных на станциях, ближайших к месту постановки профилографа Аквалог, и собственно SBE 52-MP CTD показало различие между данными температуры менее 0.002°C и солёности не более 0.007 епс (рис. 4), что соответствует ранее установленной оценке заявленной точности датчиков SBE 52-MP CTD, с учётом его работы в течение полутора месяцев. В то же время, профили растворенного в воде кислорода показали систематическое отклонение, около 20 мкмоль/кг, которое в три раза хуже номинальной точности SBE 43F.

Выявленные поправки использовались для коррекции данных SBE 52-MP CTD, а именно, значений солёности и концентрации растворенного в воде кислорода.

Таким образом, принимая во внимание результаты первичной обработки исходных данных SBE 52-MP CTD, а также последующую их верификации по

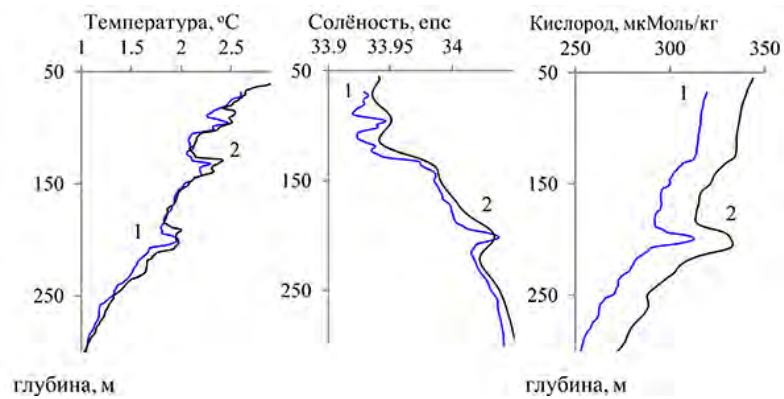


Рис. 4. Вертикальные профили температуры, солёности и содержания растворенного в воде кислорода, измеренные 30 мая 2015 г. профилографом Аквалог (1) и на ближайшей станции с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (2).

данным судовых зондирований SBE-911plus, погрешности полученного массива гидрологической информации оцениваются пределами: по температуре не более  $\pm 0.002^\circ\text{C}$ , электропроводности –  $\pm 0.003$  мСм/см, давлению –  $\pm 2$  дбар и содержанию растворённого в воде кислорода менее  $\pm 10$  мкмоль/кг.

Временные вариации температуры, солёности и аномалий плотности в слое 65–300 м по данным профилографа Аквалог (рис. 5) отражают разномасштабность динамических процессов на континентальном склоне Японского моря в течение периода наблюдений. При этом наибольшие амплитуды вариаций термохалинных

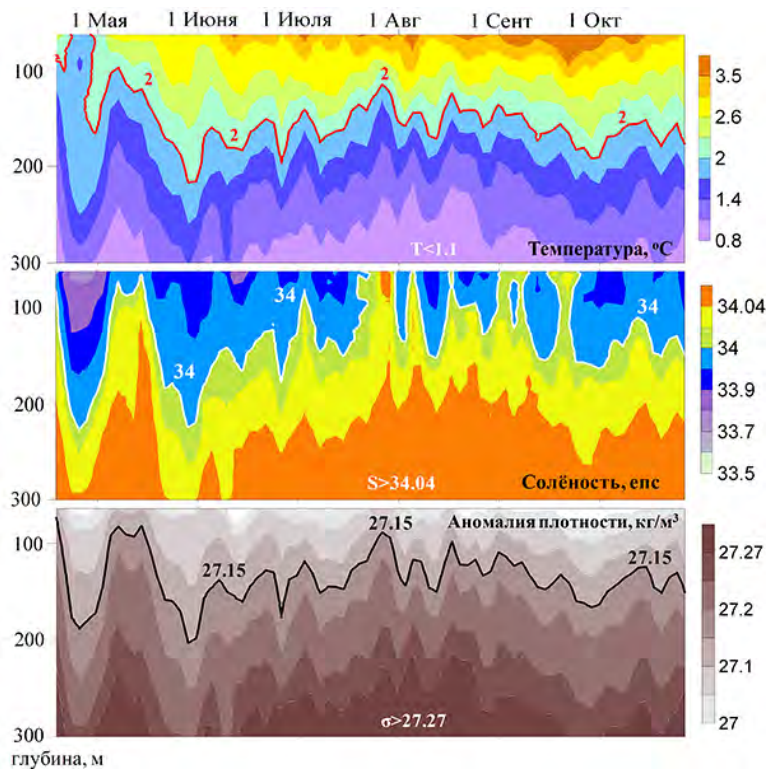


Рис. 5. Температура, солёность и аномалия плотности, измеренные с помощью профилографа Аквалог в слое 65–300 м на континентальном склоне Японского моря с 18 апреля по 15 октября 2015 г.

параметров приходится на апрель-май 2015 г., что свидетельствует о большей интенсивности термодинамических процессов в весенний сезон, чем в последующий летне-осенний период 2015 г.

### 5. Анализ вертикальной структуры синоптического вихря

Крупномасштабные изменения в вертикальном распределении гидрофизических характеристик, зафиксированные профилографом Аквалог с 21 мая по 3 июня 2015 г. (рис. 5), характерны для антициклонического вихря. Момент формирования этого вихря в зоне Приморского течения и его структурные проявления в поле поверхностной температуры исследуемого района удалось проследить по серии ИК изображений радиометром высокого разрешения (AVHRR) ИСЗ NOAA. Изображения температуры поверхности Японского моря (ТПМ) были получены из архива Центра регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН (<http://satellite.dvo.ru>). На рис. 6 представлен снимок AVHRR от 30 мая, соответствующий дате выполнения океанологического разреза НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

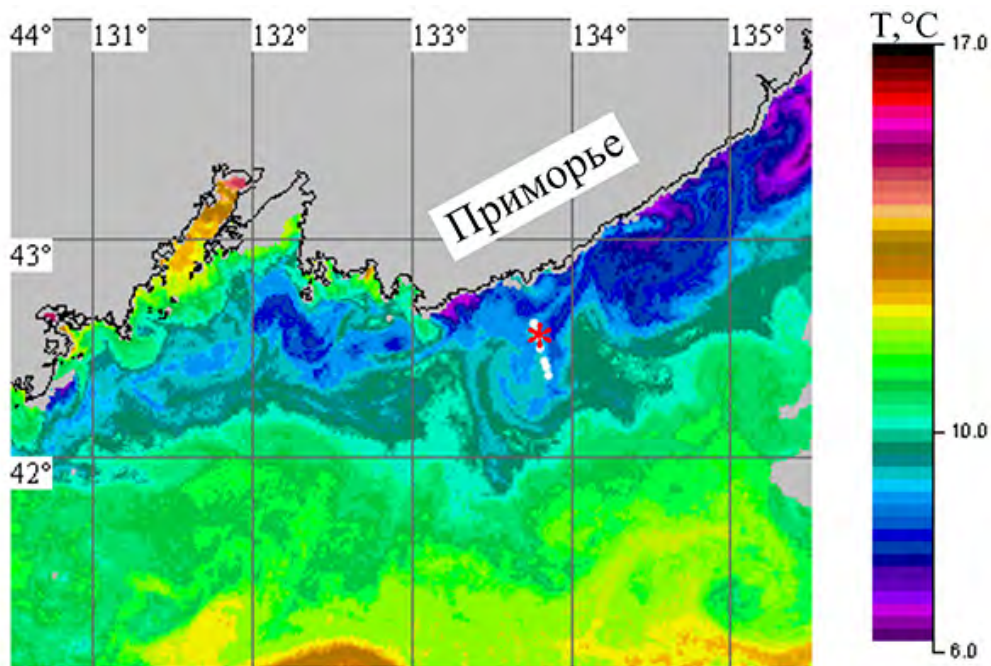


Рис. 6. Температура поверхности северо-западной части Японского моря 30 мая 2015 г. (данные радиометра AVHRR ИСЗ NOAA). Точками показаны станции судового разреза НИС «Академик М.А. Лаврентьев», звездочкой – место установки профилографа Аквалог.

К сожалению, ввиду значительного облачного покрова 23–29 мая над исследуемой частью Японского моря не представляется возможным проследить изменения в поле ТПМ с даты формирования этого вихря (22 мая) и до его прохода над районом постановки профилографа Аквалог. Размеры вихря, уверенно наблюдавшегося в поле температуры поверхности моря с 30 мая по 8 июня, составляли 60–

80 км, он перемещался с Приморским течением в юго-западном направлении вдоль континентального склона от 42.45° с.ш., 133.75° в.д. до 42.28° с.ш., 133.32° в.д. В центре вихря находились более холодные воды, поступившие с северо-востока из прибрежной области, которые переносились по его восточной периферии в сторону открытого моря, а теплая вода перемещалась из открытой части моря в сторону берега по западной периферии вихря.

Фрагмент данных SBE 52-MP CTD (рис. 7) детализирует особенности прохождения вихря через район постановки профилографа. В период с 21 по 26 мая на глубинах 30–70 м имеют место прогибы изотерм 1.4–2.4°C, изогалин 33.94–34.02 епс и изопикн 27.1–27.2 кг/м<sup>3</sup>, которые, по-видимому, вызваны поступлением 26–27 мая в район установки профилографа относительно легких, теплых и распресненных вод. Центр же вихря прошел южнее. 27–28 мая на глубинах 65–70 м находились более холодные и менее соленые воды (в сравнении с предыдущим и последующим периодами наблюдений), которые имели температуру менее 2.6°C и соленость менее 33.9 епс. Их наличие, по-видимому, связано с выносом вод Приморского течения по восточной периферии вихря. Тыловая зона вихря прошла через район станции Аквалог 28–31 мая, что привело к изменениям температуры, солености и плотности воды (рис. 7). Эти аномалии, возможно, свидетельствуют об усилении процессов перемешивания в диапазоне глубин измерений.

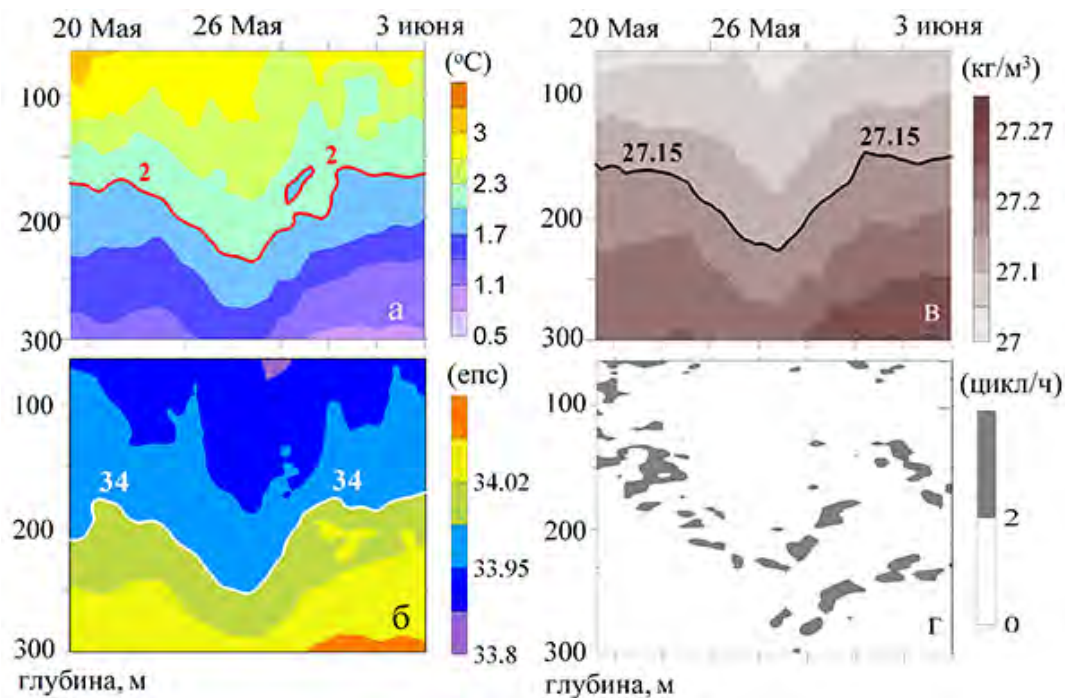


Рис. 7. Температура (а), соленость (б), аномалия плотности (в) и частота Брента-Вяйсяля (г) в осях «время – глубина» по данным зонда SBE 52-MP CTD профилографа Аквалог в период с 20 мая по 3 июня 2015 г.

Принимая во внимание изменения (в осях «время – глубина» по данным профилографа Аквалог) положения изоповерхностей и локальных максимумов частоты Брента-Вяйсяля:



$$N(z) = \sqrt{\frac{g}{\rho_{\Theta}} \frac{d\rho_{\Theta}}{dz}}, \quad (9)$$

характеризующей вертикальное распределение потенциальной плотности  $\rho_{\Theta}(z)$ , можно оценить время прохождения вихря над местом его установки как  $T \approx 10$ – $11$  сут. (рис. 7). По спутниковым данным диаметр этого вихря не превышает  $d \approx 60$ – $80$  км (см. выше). Соответственно скорость его перемещения,  $V = d/T$ , при разных комбинациях параметров варьирует от 6 до 9 см/с, составляя в среднем 7.7 см/с. В работе (Ладыченко, Лобанов, 2013) скорости перемещения вихрей в заливе Петра Великого и над склоном к югу от него оценивались как 3–6 см/с. Следует, однако, иметь в виду, что вихри в заливе Петра Великого были относительно невелики, их наиболее повторяемые размеры составляли от 20 до 60 км. Представляется вполне возможным, что рассматриваемый в данной работе более крупный вихрь, связанный с Приморским течением, двигался быстрее.

Так же следует отметить, что субарктическая структура вод, свойственная району исследования, характеризуется тонким пикноклином и малым бароклинным радиусом деформации Россби, который в теплый период года не превышает 7–10 км (Park et al., 2007), и формирование синоптических вихрей размером до 80 км (при ширине шельфа не более 25 км), свидетельствует о наличии значительной баротропной составляющей.

К 30 мая вихрь переместился на юго-запад, поэтому место установки профилографа Аквалог и разрез, выполненный НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в этот день, оказались восточнее центра вихря, но западнее зоны адвекции холодных вод в сторону открытого моря (см. рис. 6). Тем не менее, данные судового зондирования SBE-911plus на станции разреза, расположенной на широте  $42.5^{\circ}$  с.ш. показали подъем изотерм  $2.25$ – $2.75^{\circ}\text{C}$  на 10–15 м и опускание изотерм  $1.25$ – $1.75^{\circ}\text{C}$  на 40–50 м, т.е. наличие линзообразной структуры (рис. 8). Линзообразную структуру в этом районе демонстрируют и судовые данные измерений солености. В районе к югу от  $42.45^{\circ}$  с.ш. наблюдался подъем изотерм  $1$ – $2^{\circ}\text{C}$  и изогалин 33.98–34.05 епс в сторону открытого моря (рис. 8).

Прохождение вихря в районе станции Аквалог сопровождалось изменением вертикальной стратификации. Наибольшие вертикальные градиенты плотности к моменту подхода вихря, 20–21 мая, в единицах частоты Брента-Вяйсяля (9) не превышали 2–2.5 цикл/час и располагались на горизонтах 150–170 м (см. рис. 7). При прохождении ядра вихря 26–27 мая эти экстремумы опустились на глубину 220–250 м, а выше находились воды с пониженной стратификацией (1–1.5 цикл/час). 28–29 мая в тылу вихря наблюдалось расщепление пикноклина: между слоями градиентов 2–2.5 цикл/час, расположенных на горизонтах 200 и 240 м, находился промежуточный квазиоднородный слой (градиенты плотности менее 1.5 цикл/час), что говорит о наличии интрузии. Следует отметить, что слой скачка (сезонный пикноклин) находился на глубине около 50 м, что видно на станциях разреза (см. рис. 8), т.е. выше диапазона профилирования Аквалога (см. рис. 7).



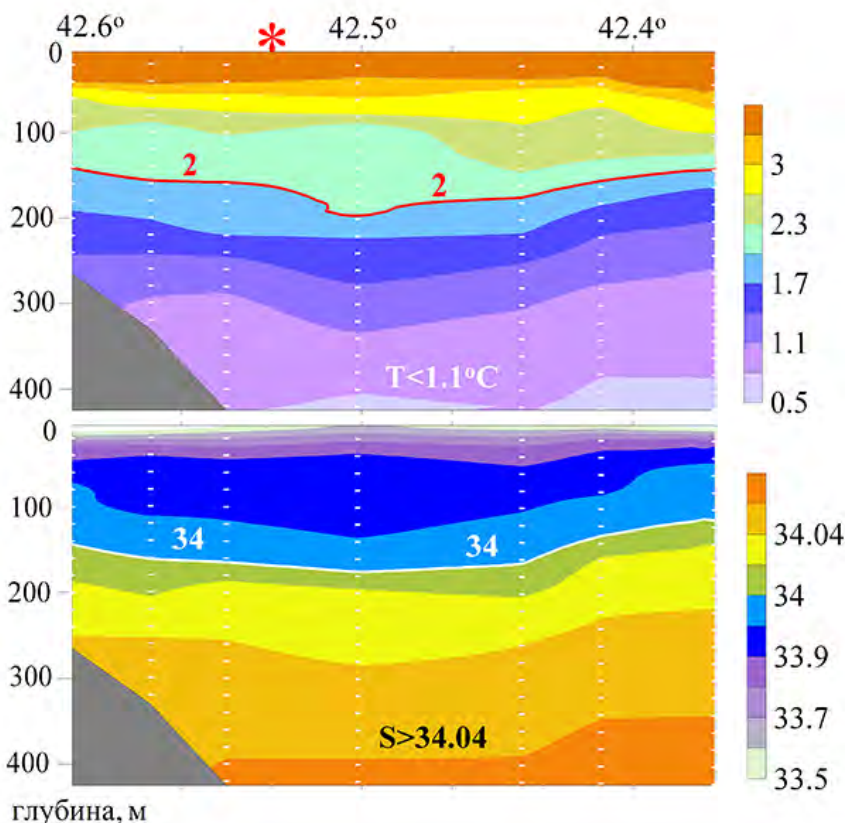


Рис. 8. Распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) и солёности (епс) на океанологическом разрезе, выполненном НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 30 мая 2015 г. (см. положение станций разреза на рис. 6) в осях «широта – глубина». Вертикальные линии показывают положение станций зондирования, звёздочка – место установки профилографа Аквалог.

Сравнение вертикальных профилей температуры и солёности, измеренных с борта судна и профилографом Аквалог (см. рис. 4), выявило несоответствие их локальных экстремумов на горизонтах выше 150 м, что свидетельствует о пространственной неоднородности подповерхностных вод, захваченных вихрем, и о наличии мелкомасштабных динамических процессов. Данные также показали инверсионный слой, который располагался на больших глубинах с центром на горизонте 200 м и имел локальные аномалии температуры около  $0.2^{\circ}\text{C}$  и солёности около 0.03 епс. Его наличие, по-видимому, обусловлено проникновением в исследуемую зону теплых и более солёных вод с внешней периферии вихря. Подобные особенности не выявлены на профилях температуры и солёности, измеренных на станциях, расположенных ближе к берегу.

## 6. Заключение

С помощью профилографа Аквалог в составе заякоренной станции, установленной на континентальном склоне в северо-западной части Японского моря в период с апреля по октябрь 2015 г., были проведены уникальные экспериментальные ис-

следования термохалинной структуры вод северо-западной части Японского моря. Массив данных содержит более 700 парных профилей основных гидрологических параметров, полученных регулярно с дискретностью 4 раза в сутки с частотой 1 Гц на подъеме и спуске профилографа в слое 65–300 (420) м с помощью модуля SBE 52-MP CTD, который был установлен на профилографе. Анализ погрешностей STD данных, выполненный в процессе их первичной обработки, выявил, в том числе и нехарактерные проявления инерционных эффектов. В частности, серия профилей температуры воды показала кратковременный (в течение шести суток) рост в 2-4 раза инерционности термометра, причина которого не установлена.

Первичная обработка массива исходных данных зонда SBE 52-MP CTD, выполненная специально разработанной программой CTDdata\_cor\_SBE\_52-MP, в которой алгоритмы стандартных процедур программы SBE-Data Processing дополнены количественными критериями, позволила минимизировать вклады динамических и случайных погрешностей при определении величин гидрологических параметров. Верификация измерений SBE 52-MP CTD по данным зондирований SBE-911plus, выполненных 30 мая с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев», позволила устранить также и систематические компоненты погрешностей. В результате, качественные показатели гидрофизической информации, полученной профилографом Аквалог, удалось привести к стандартам WOCE, а именно, по температуре до  $\pm 0.002^\circ\text{C}$ , по электропроводности до  $\pm 0.003$  мСм/см, по давлению до  $\pm 2$  дбар.

Анализ вариаций температуры, солёности и аномалии плотности, выполненный по массиву обработанных данных профилографа Аквалог, продемонстрировал разномасштабность термодинамических процессов в исследуемом районе Японского моря. В частности, в период с 21 мая по 3 июня профилограф зарегистрировал термохалинную структуру, характерную для антициклонического вихря. Детализация некоторых пространственно-временных характеристик этого вихря стала возможной после привлечения спутниковых данных ИСЗ NOAA и гидрологических станций разреза, выполненных с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев».

В целом, применение профилографа Аквалог в составе заякоренной станции, установленной на континентальном склоне северо-западной части Японского моря, в сочетании с судовыми разрезами и спутниковыми съемками весьма перспективно для развития 4-х мерной океанографии.

Авторы выражают признательность капитану и команде НИС Академик М.А. Лаврентьев за помощь при выполнении работ в рейсе № 69, а также А.Ф.Сергееву, А.А. Воронину, И.А.Горину и П.Ю.Семкину за работы по подъему станции в октябре 2015 г.

Результаты исследований, представленные во Введении и в разделах 1 и 7, получены в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010). Результаты исследований, представленные в разделах 2, 3, 4 и 6, получены за счет средств РФФИ (проект №16-05-00899). Результаты исследований, представленные в разделе 5, получены за счет средств РФФИ (проект №16-55-50071-яф-а). Результаты исследований, представленные в разделе 6, получены за счет средств гранта 15-I-1-047 программы приоритетных исследований ДВО РАН Дальний Восток.

## Литература

- Архипкин В.С., Лазарюк А.Ю., Левашов Д.Е., Рамазин А.Н. Океанология // Инструментальные методы измерения основных параметров морской воды: Учебное пособие. М.: Изд-во МАКС Пресс, 2009. 335 с.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буйев) // Исследование Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66–83.
- Жадан П.М., Ващенко М.А., Лобанов В.Б., Котова С.А. Исследование влияния факторов среды на нерест морского ежа *Strongylocentrotus intermedius* // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 170–179.
- Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я. Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // Океанология. 2006. Т. 46. № 1. С. 27–37.
- Ладыченко С. Ю. Изменение термической структуры поверхностных вод у побережья Приморья в осенний период 2000 г. // Океанологические исследования: сб. статей по мат. конф. молодых ученых ТОИ ДВО РАН (27–30 ноября 2001 г.). Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 75–83.
- Ладыченко С. Ю., Лобанов В. Б. Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 3-15.
- Лазарюк А.Ю. Динамическая коррекция STD-данных // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2 (8). С. 59–71.
- Лазарюк А.Ю. Коррекция динамической погрешности данных глубоководных гидрологических наблюдений с помощью STD-зондов (STDdata\_cor): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617298. Правообладатель: ТОИ ДВО РАН. Зарегистрировано в реестре 1 ноября 2010 г.
- Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н., Тищенко П.Я., Тэлли Л.Д. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря. Том 1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 450–473.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И. Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2008. № 5. С. 2–57.
- Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьёв В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
- Островский А.Г. Заякоренные мобильные профилирующие аппараты // Освоение глубин океана. Ред. Б.А. Нерсесов. М.: Оружие и технологии, 2017 (в печати).
- Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А., Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б. Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 100–104.
- Юрасов Г.И., Ванин Н.С., Никитин А.А. Характеристики фронтов в Японском море по данным судовых и спутниковых измерений // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 93–105.
- Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ДВО РАН, 1991. 176 с.
- Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., K. Kim, M. Takematsu, and J.-H. Yoon. A history of physical oceanography research in the Japan/East Sea // Oceanogr. 2006. Vol. 19. No. 3. P. 18–31.

А.Ю. Лазарюк и др.

- Fofonoff N.P., Millard R.S.* Algorithms for computation of fundamental properties of sea water // UNESCO Technical Papers in Marine Science. 1983. Vol. 44. 53 p.
- Operator's manual. SBE Data Processing 7.23.2. <http://www.seabird.com>.
- SBE 52-MP Moored Profiler CTD & (optional) Dissolved Oxygen Sensor. <http://www.seabird.com>.
- Park K.-A., Ullman D.S., Kim K., Chung J.Y., Kim K.-R.* Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea // Deep Sea Research. I. 2007. Vol. 54, No. 4. P. 453–470.
- The acquisition, calibration, and analysis of CTD data. // UNESCO technical papers in marine science. 1988. Vol. 54. 94 p.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMOHALINE STRUCTURE AT THE CONTINENTAL SLOPE IN THE NORTH-WESTERN JAPAN SEA

**A.Yu. Lazaryuk<sup>1</sup>, D.D. Kaplunenko<sup>1</sup>, A.G. Ostrovskii<sup>2</sup>, V.B. Lobanov<sup>1</sup>,  
O.O. Trusenkova<sup>1</sup>, S.Yu. Ladychenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, Russia, 690041*  
e-mail: [lazaryuk@poi.dvo.ru](mailto:lazaryuk@poi.dvo.ru)

<sup>2</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nahimovskiy prospekt, Moscow, Russia, 117997* e-mail: [osasha@ocean.ru](mailto:osasha@ocean.ru)

Submitted 10.10.2017, accepted 25.12.2017

The pioneering long-term survey of the NW Japan Sea thermohaline structure was implemented for almost half a year from April 18, 2015 through October 15, 2015. The measurements were carried out by using the SBE 52-MP CTD probe at the moored profiler Aqualog. The profiler mooring was deployed at the continental slope in the area east of Peter the Great Bay. A novel approach to the primary processing of the profiler CTD data is discussed. It features a new data processing software CTDdata\_cor\_SBE\_52-MP. The profiler data is verified based on ship measurements at a cross-slope transect on May 30, 2015. The processing and verification of the SBE 52-MP CTD observations allows for the data quality improvement up to the WOCE standards. The profiler mooring data and the ship measurements reveal variations in the ocean temperature, salinity, and density stratification due to ocean eddy passage nearby the mooring site. The NOAA/AVHRR infrared satellite imagery is used for detection and analysis of this eddy and its movement southwestward along the Primorye Current zone. Overall, the study demonstrates a powerful potential of combined analysis of long-term time series of the in situ data at fixed geographical location, the ship borne oceanographic section, and the multispectral satellite information in compliance with the 4D oceanography requirements.

**Keywords:** CTD data analysis, moored profiler, infrared satellite imagery, ocean thermohaline structure, mesoscale eddy, the Japan Sea, the Primorye Current, 4D oceanography.



## References

- Arkhipkin V.S., Lazaryuk A.Yu., Levashov D.E., Ramazin A.N., Okeanologiya, Instrumental'nye metody izmereniya osnovnykh parametrov morskoi vody (Oceanology. Instrumental methods for measuring the main parameters of sea water), Moskva: Izd-vo MAKS Press, 2009, 335 p.
- Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., K. Kim, M. Takematsu and J.-H.Yoon. A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea, *Oceanography*, 2006, Vol. 19, No. 3, pp. 18–31.
- Fofonoff N.P., Millard R.S. Algorithms for computation of fundamental properties of sea water, *UNESCO Technical Papers in Marine Science*, 1983, Vol. 44, 53 p.
- Ginzburg A.I., Kostyanoi A.G., Ostrovskii A.G., Poverkhnostnaya tsirkulyatsiya Yaponskogo morya (sputnikovaya informatsiya i dannye dreifuyushchikh buev) (Surface circulation of the Sea of Japan (satellite information and drifting buoy data)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 1, pp. 66–83.
- Ladychenko S.Yu., Izmenenie termicheskoi struktury poverkhnostnykh vod u poberezh'ya Primor'ya v osennii period 2000 (Change in the thermal structure of surface waters off the coast of Primorye in the autumn 2000), In: Okeanologicheskie issledovaniya (Oceanological research), Vladivostok: Dal'nauka, 2002, pp. 75–83.
- Ladychenko S.Yu., Lobanov V. B., Sinopticheskie vikhri v raione zaliva Petra Velikogo po sputnikovym dannym (Synoptic vortexes in the area of Peter the Great Bay according to satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 3–15.
- Lazaryuk A.Yu., Dinamicheskaya korrektsiya CTD-dannykh (Dynamic correction of the CTD data), *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2009, No. 2 (8), pp. 59–71.
- Lazaryuk A.Yu., Korrektsiya dinamicheskoi pogreshnosti dannykh glubokovodnykh gidrologicheskikh nablyudenii s pomoshch'yu CTD-zondov (CTDdata\_cor) (Correction of the dynamic error of CTD data (CTDdata\_cor)), Certificate of state registration of the PC computer program No. 2010617298, 2010, November 1.
- Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Tishchenko P.Ya., Telli L.D., Struktura i dinamika sinopticheskikh vikhrei severnoi chasti Yaponskogo morya, Dal'nevostochnye morya (Structure and Dynamics of Synoptic Vortices in the Northern Part of the Sea of Japan), In: Okeanologicheskie issledovaniya (Oceanological research), Vol. 1, Moscow: Nauka, 2007, pp. 450–473.
- Nikitin A.A., Yurasov G.I., Sinopticheskie vikhri Yaponskogo morya po sputnikovym dannym (Synoptic vortices of the Sea of Japan according to satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 5, pp. 2–57.
- Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Soloviev V.A., Tsibulsky A.L., Shvoev D.A. Autonomous system for vertical profiling of the marine environment at a moored station, *Oceanology*, 2013, Vol. 53, No. 2, pp. 233–242.
- Ostrovskii A.G., Zayakorennye mobil'nye profiliruyushchie apparaty (Moored mobile profilers), In: Osvoenie glubin okeana (The development of the depths of the ocean), Moscow: Oruzhie i tekhnologii, 2017 (in print).
- Operator's manual. SBE Data Processing 7.23.2. <http://www.seabird.com>.
- SBE 52-MP Moored Profiler CTD & (optional) Dissolved Oxygen Sensor. <http://www.seabird.com>.
- Ponomarev V.I., Faiman P.A., Dubina V.A., Ladychenko S.Yu., Lobanov V.B., Sinopticheskaya vikhrevaya dinamika nad severo-zapadnym materikovym sklonom i shel'fom Yaponskogo morya (modelirovanie i rezul'taty distantsionnykh nablyudenii) (Synoptic vortex dynamics over the north-western continental slope and the shelf of the Sea of Japan (modeling and results of remote observations)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 100–104.
- Park K.-A., Ullman D.S., Kim K., Chung J.Y., Kim K.-R. Spatial and temporal variability of satellite-observed Subpolar Front in the East/Japan Sea, *Deep Sea Res. I.*, 2007, Vol. 54, No. 4, pp. 453–470.
- The acquisition, calibration, and analysis of CTD data, *UNESCO technical papers in marine science*, 1988, Vol. 54, 94 p.
- Yurasov G.I., Vanin N.S., Nikitin A.A. Characteristics of fronts in the Sea of Japan in accordance



А.Ю. Лазарюк и др.

with vessel and satellite measurements, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, Vol. 34, No. 4, pp. 256–264.

*Yurasov G.I., Yarichin V.G.*, *Techeniya Yaponskogo moray (The currents of the Sea of Japan)*, Vladivostok: DVO RAN, 1991, 176 p.

*Zhadan P.M., Vashchenko M.A., Lobanov V.B., Kotova S.A.*, *Issledovanie vliyaniya faktorov sredy na nerest morskogo ezha Strongylocentrotus intermedius (Investigation of the influence of environmental factors on the spawning of a sea urchin Strongylocentrotus intermedius)*, *Vestnik DVO RAN*, 2013, No. 6, pp. 170–179.

*Zvalinskii V.I., Lobanov V.B., Zakharkov S.P., Tishchenko P.Ya.* Chlorophyll, delayed fluorescence, and primary production in the northwestern part of the Sea of Japan, *Oceanology*, 2006, Vol. 46, No. 1, pp. 23–32.

## АРГО-МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ОКЕАНА: СИНТЕЗ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

К.В. Лебедев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [KLebedev@ocean.ru](mailto:KLebedev@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 15.11.2017, одобрена к печати 25.12.2017

В статье представлены некоторые результаты расчетов по недавно разработанной в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН Арго–Модели Исследования Глобального Океана (АМИГО), которая состоит из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования дрейфующих измерителей Арго и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей. Разработанная методика позволяет получать по нерегулярно расположенным данным измерений Арго полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений. Выполненные расчеты представлены ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями на одноградусной сетке и охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг.

**Ключевые слова:** океан, моделирование, климат, циркуляция, течения, переносы, Арго.

### Введение

Наступление в конце XX века эры спутниковых наблюдений за поверхностью океана и развитие в первые годы XXI века проекта Argo, направленного на сбор с использованием спутников информации о толще океана, дает уникальные возможности непрерывного мониторинга состояния Мирового океана. Целью проекта Argo является создание и поддержание постоянно действующей глобальной сети океанографических станций на основе дрейфующих буев-измерителей. Работа измерителей происходит по следующей схеме. Буй дрейфует около 10 суток на заданной глубине, затем опускается на горизонт 2000 м и всплывает на поверхность, измеряя температуру и соленость. В течение 6–12 часов прибор находится на поверхности, данные передаются на спутники, которые определяют точное местоположение прибора. После этого буй опускается на глубину дрейфа, и цикл повторяется. Энергии батарей хватает на 3–4 года работы. Кроме измерений температуры и солености такие дрейфующие буи позволяют также получать данные о течениях на глубине дрейфа и на поверхности океана (Lebedev et al., 2007).

С 2005 г. измерения с помощью поплавков Арго стали вести на большей части акватории Мирового океана. Заявленного при разработке программы Argo уровня покрытия в 3000 одновременно работающих поплавков (в среднем 1 поплавок на трехградусный “квадрат”) удалось достичь в ноябре 2007 г. Сейчас около 4000 измерителей Арго осуществляют автономное зондирование верхней двухкиломе-

тровой толщи океана от Антарктики до Шпицбергена с 10-дневным интервалом, ежемесячно пополняя базу данных по температуре и солености Мирового океана на 10–12 тыс. полноценных профилей. Постоянно пополняющиеся массивы измерений позволяют решать задачи реконструкции и мониторинга состояния океана в режиме, близком к реальному времени, и исследовать особенности океанской динамики и ее изменчивости (Sasaki et al., 2010). Количество профилей, накопленных в рамках программы Арго за период с 2001 по 2015 гг., превысило 1 млн. Это позволяет получить разумные оценки климатического состояния Мирового океана для последнего десятилетия и дать оценку текущим внутриклиматическим трендам.

В настоящей статье приведены примеры расчетов, сделанных с использованием Арго-Модели Исследования Глобального Океана (АМИГО), и представлены результаты ведущихся в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) работ по созданию новых, ориентированных на конечных пользователей массивов АМИГО, основанных на измерениях Арго (Argo, 2000) и данных спутниковой альтиметрии, которые используются для контроля решения при выборе параметров модели. Массивы АМИГО обеспечат научное сообщество оперативным доступом к глобальным унифицированным базам данных, полученным по измеренным профилям и траекториям поплавков Арго с привлечением дополнительных данных, сделанных с помощью спутников. Главной отличительной особенностью представленной методики является использование при обработке профилей Арго метода вариационной интерполяции измерений на регулярную сетку с последующей модельной гидродинамической адаптацией полученных полей. Такая методика позволяет получать по данным профилирования Арго полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений. Выполненные расчеты (Лебедев, 2016) охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. и представлены ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями. База данных АМИГО находится в свободном доступе в сети Интернет на официальном сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>. Пространственное разрешение данных в базе составляет 1 градус по долготе и широте, временное – 1 месяц.

### Методика

Интерполяция на регулярную одноградусную сетку полей температуры и солености по данным профилей Арго была выполнена методом вариационной интерполяции, который минимизирует отклонение рассчитанных в узлах регулярной сетки полей от нерегулярно расположенных измерений таким образом, что полученное оптимальное решение проходит максимально близко к данным измерений. Такая методика успешно применялась в более ранних работах с участием автора (Lebedev et al., 2010; Курносова, Лебедев, 2014). Математически задача описывается следующим образом (Лебедев, 2016):

$$F = \sum_{n \in L} (A_{g-d}^n - A_d^n)^2 + C_1 \sum_{i,j} (A_g^{i,j} - A_c^{i,j})^2 + C_2 \sum_{i,j} ((dX^j)^2 \Delta A_g^{i,j})^2,$$

где  $F$  – функционал, который требуется минимизировать,  $A_g^{i,j}$  – значения переменной  $A$  (температура или соленость) в узлах регулярной сетки,  $A_d^n$  – нерегулярно расположенные данные измерений,  $A_{g-d}^n$  – линейная интерполяция в точку измерения  $A_d^n$  – значений переменной  $A_g$  из четырех окрестных узлов регулярной сетки,  $A_c^{i,j}$  – климатические данные в узлах регулярной сетки,  $\Delta$  – пятиточечный разностный аналог оператора Лапласа с граничными условиями в виде отсутствия потоков через боковые границы,  $dX^j$  – расстояние между узлами сетки в зональном направлении,  $C_1$  и  $C_2$  – весовые коэффициенты,  $L$  – временной интервал (месяц, сезон, год и т.п.).

Значения переменной  $A_g^{i,j}$  в узлах регулярной сетки, полученные в результате минимизации функционала  $F$ , будут зависеть от коэффициента  $C_1$ , определяющего влияние на результирующее поле климатических данных, и коэффициента  $C_2$ , контролирующего уровень сглаживания получаемого решения. Коэффициент  $C_1$  выбирается достаточно малым, чтобы минимизировать влияние климатических данных на те области, где имеются измерения. Для сглаживающего коэффициента  $C_2$  в операторе Лапласа выбирается минимальное значение, при котором происходит подавление шума. Окончательные значения коэффициентов уточнялись по результатам модельных адаптационных расчетов, методика проведения которых описана ниже. Полученные в результате таких расчетов поля уровня океана (рис. 1а) сравнивались с данными спутниковой альтиметрии Aviso (Ducet, Le Traon, Reverdin, 2000) для соответствующего периода (рис. 1б). По результатам численных экспериментов в качестве коэффициента  $C_1$  было выбрано значение 0.3.

Значения коэффициента  $C_2$  при расчете «климатических» полей температуры и солености по данным Арго 2005–2014 гг. для месяцев, сезонов и года бралось равным 2/3. При этом в качестве климатических полей  $A_c$  использовались данные климатических массивов World Ocean Atlas 2009 (WOA09) (Antonov et al., 2010; Locarnini et al., 2010). Всего таким образом было получено 17 полей (12 месяцев, 4 сезона и средний год). Зимний сезон представлен данными января, февраля и марта, весенний – апреля, мая и июня, летний – июля, августа и сентября, осенний – октября, ноября и декабря.

Значения коэффициента  $C_2$  при расчете полей температуры и солености для индивидуальных месяцев, сезонов и годов 10-летнего периода с 2005 по 2014 гг. (всего 170 полей) бралось равным 2. В этих расчетах в качестве климатических полей  $A_c$  для года и сезонов вместо массивов WOA09 использовались соответствующие «климатические» поля Арго, полученные на предыдущем шаге. При расчете по данным Арго климатических полей  $A_c$  для месяцев дополнительно привлекалась информация предыдущего и последующего месяцев (для расчета «климатического» января использовались данные Арго за декабрь, январь и февраль, февраля – за январь, февраль и март и т.д.).

На заключительном этапе работы с использованием модели общей циркуляции океана в режиме диагноза и гидродинамической адаптации (Иванов, Лебедев, Саркисян, 1997; Лебедев, 1999) были выполнены расчеты гидродинамически сба-

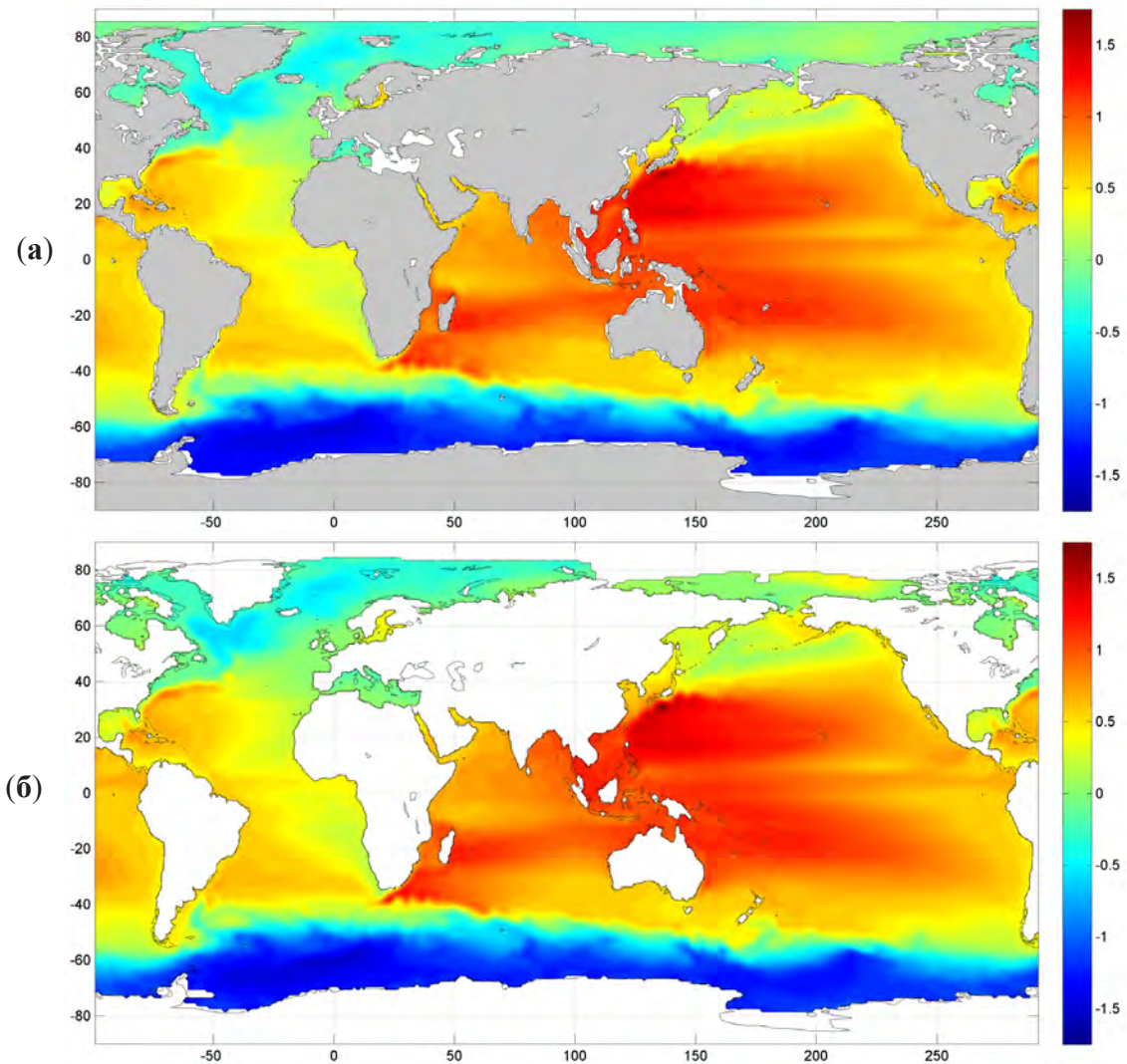


Рис. 1. Среднегодовое поле динамического уровня Мирового океана (м) по данным расчетов АМИГО (а) и по данным спутниковой альтиметрии Aviso (б) за 2005–2014 гг.

лансированных полей температуры, солёности и скорости течений по данным поплавок Арго. Расчеты проводились для акватории Мирового океана, ограниченной на севере  $85.5^\circ$  с.ш. на сетке с шагом  $1^\circ$  по долготе и широте, на 32 горизонтах, соответствующих горизонтам массивов WOA09; максимальная глубина океана составляла 5750 м. На глубинах, превышающих 2000 м, где отсутствуют измерения Арго, значения температуры и солёности брались из массивов WOA09. В качестве граничных условий на поверхности океана задавались постоянные значения температуры и солёности, полученные по данным Арго для соответствующего месяца (года, сезона) с использованием описанной выше вариационной методики. Тангенциальное напряжение трения ветра для соответствующего месяца (года, сезона) задавалось по данным реанализа ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011).

Для корректного описания водообмена при использовании одноградусной модельной сетки была проведена корректировка рельефа дна для ряда ключевых районов Мирового океана (Флоридский пролив, западная граница Гольфстрима,



пролив Нэрса, Берингов пролив, район течения Куроисио, Индонезийские проливы и другие). В результате такой корректировки также удалось устранить многие несоответствия измеренных полей плотности модельному одноградусному рельефу дна, что привело к устойчивому поведению решения при коэффициенте бокового турбулентного обмена импульсом равным  $7 \times 10^6$  см<sup>2</sup>/с. Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена теплом и солью также задавались как  $7 \times 10^6$  см<sup>2</sup>/с. Вертикальный коэффициент турбулентного обмена брался равными 10 см<sup>2</sup>/с для импульса и 1 см<sup>2</sup>/с для тепла и соли. В экваториальных областях, начиная с 20° северной и южной широт, коэффициент бокового обмена импульсом плавно увеличивается, достигая величины  $2 \times 10^8$  см<sup>2</sup>/с на экваторе. Суммарная адаптация экваториальной области Тихого океана продолжалась 86 суток, экваториальных областей Атлантического и Индийского океанов – 52 суток, внеэкваториальных областей Мирового океана – 12 суток. В результате расчетов по модели получают адаптированные поля (месячные, сезонные и годовые) температуры, солёности, плотности и течений Мирового океана на одноградусной сетке, полученные с использованием данных Арго.

Выполненные расчеты охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. и представлены ежемесячными (120 полей), сезонными (40 полей), годовыми (10 полей), а также среднеклиматическими для 2005–2014 гг. данными (17 полей, включающие среднеклиматический год, сезоны и месяцы) с пространственным разрешением 1 градус по долготе и широте (Лебедев, 2016). Сравнение результатов модельных расчетов с данными дрейфтеров показало, что поля температуры и солёности, полученные по нерегулярно расположенным данным измерений Арго с использованием вариационной методики интерполяции данных на регулярную сетку, восстанавливают реалистичные поля течений (Лебедев, Саркисян, Никитин, 2016; Саркисян, Никитин, Лебедев, 2016). Использование данных поверхностной солёности, полученных с использованием указанной методики, приводит к лучшему воспроизведению в моделях общей циркуляции океана межгодовой изменчивости глубины верхнего перемешанного слоя, изменчивости солёности в нижележащих слоях, а также к воспроизведению так называемых «барьерных слоев» (Figue et al., 2018). База данных АМИГО находится в свободном доступе в сети Интернет на официальном сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>.

### Основные результаты

Важной динамической характеристикой океана является уровень, изолинии которого достаточно близко воспроизводят линии тока геострофической составляющей течений в верхнем слое океана. На рис. 1 представлены карты динамического уровня Мирового океана, полученные в результате модельных расчетов с использованием данных измерений Арго за период 2005–2014 гг. (рис. 1а), и рассчитанные путем осреднения данных спутниковой альтиметрии Aviso (Ducet, Le Traon, Reverdin, 2000) за этот же период времени (рис. 1б). Хорошо видны основные эле-

менты крупномасштабной океанской циркуляции: антициклонические и циклонические круговороты, экваториальные течения Тихого и Атлантического океанов, Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ). Сравнение карт модельного (рис. 1а) и измеренного со спутников (рис. 1б) уровня показывает их хорошее соответствие друг другу.

На рис. 2 представлены рассчитанные по среднемесячным данным АМИГО графики изменчивости расходов в ряде ключевых проливов Мирового океана, где, как указывалось выше, для корректного описания водообмена при проведении модельных расчетов на одноградусной сетке была проведена корректировка рельефа дна. Средний за 2005–2014 гг. расход через Берингов пролив (рис. 2а) в результате такой коррекции получился равным  $0,63 \pm 0,57$  Св, что находится в хорошем соответствии с общепринятой оценкой 0,83 Св, полученной по данными многолетних прямых измерений (Roach et al., 1995). Изменчивость переноса из Северного Ледовитого в Атлантический океан через проливы Канадского архипелага, которые в модели представлены проливом Нэрса, добавленным в скорректированный одноградусный рельеф дна, проиллюстрирована данными переноса в проливе Дейвиса, соединяющего море Баффина с морем Лабрадор. Средний за 2005–2014 гг. расход через Дейвисов пролив (рис. 2б) получился в результате описанной выше коррекции рельефа дна равным  $1,46 \pm 0,29$  Св, что хорошо согласуется с известной из литературы оценкой  $1,6 \pm 0,5$  Св, полученной по данным прямых измерений 2004–2010 гг. (Curry et al., 2014). Несмотря на достаточно грубое разрешение Средиземного

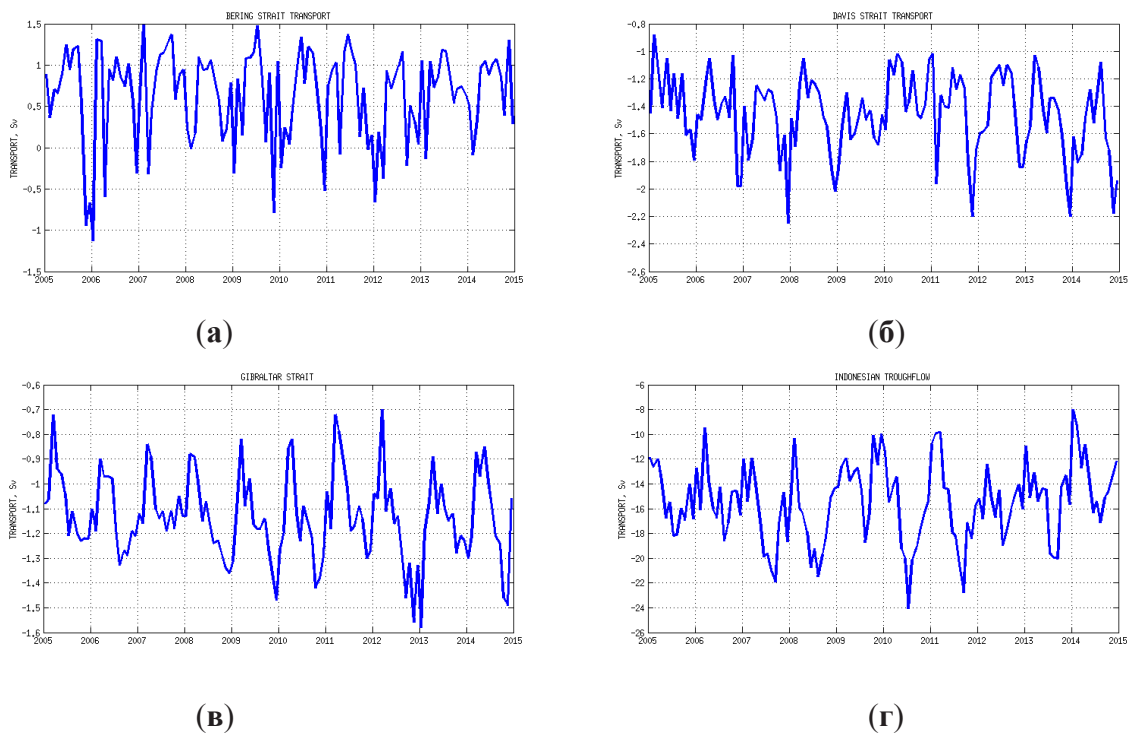


Рис. 2. Изменчивость среднемесячного расхода (Св) в Беринговом проливе (а), в проливе Дейвиса (б), придонного течения в Гибралтарском проливе (в), в Индонезийских проливах (г) для периода 2005–2014 гг.

моря, удалось получить разумные значения расхода средиземноморских вод (СМВ) в придонном течении Гибралтарского пролива (рис. 2в), который оказался равным  $1,1 \pm 0,2$  Св, что не сильно отличается от известных оценок  $0,68\text{--}0,78$  Св, основанных по данным прямых измерений (Bryden, Candela, Kinder, 1994; Soto-Navarro et al., 2010). Средний расход через Индонезийские проливы (рис. 2г), характеризующий водообмен Тихого и Индийского океанов, получился равным  $15,4 \pm 3$  Св, практически не отличаясь от оценки 15 Св, основанной на результатах проводившихся в 2004–2006 гг. прямых измерений (Sprintall et al., 2009).

На рис. 3 представлены карты средней температуры Мирового океана на горизонте 75 м для летнего (рис. 3а) и зимнего (рис. 3б) сезонов северного полушария. На картах хорошо видны антициклонические субтропические круговороты Тихого и Атлантического океанов. Круговороты асимметричны, центры круговоротов значительно сдвинуты к западу, что определяется западной интенсификацией тече-

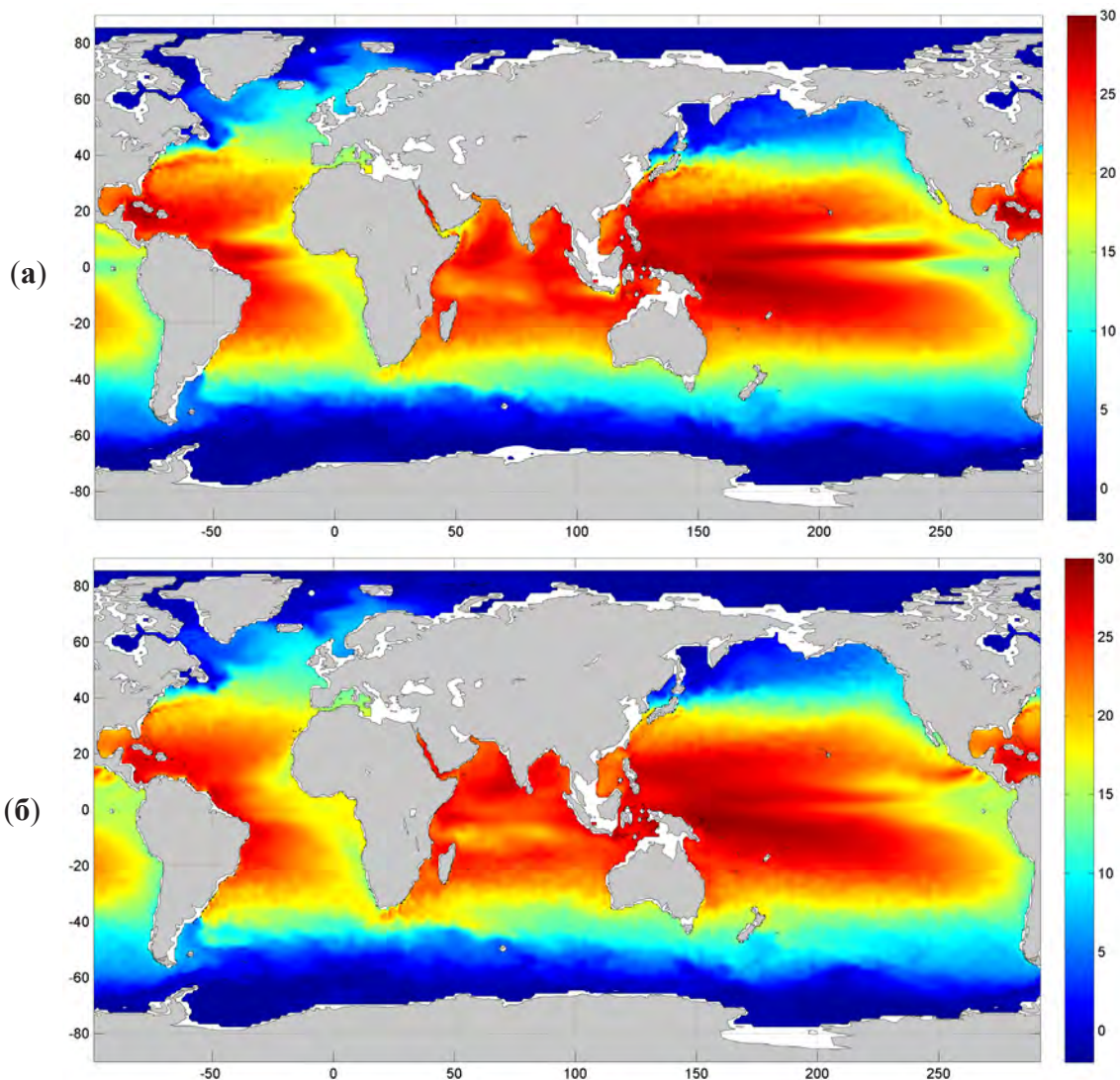


Рис. 3. Среднегодовое поле температуры Мирового океана на горизонте 75 м для летнего (а) и зимнего (б) сезонов северного полушария по данным АМИГО.



ний. Распределение температуры носит в основном зональный характер, заметные в восточных частях океанов отклонения от зонального распределения обусловлены течениями. Существенное отклонение изотерм от зонального распределения, наблюдаемое в северной части Атлантического океана, вызвано переносом на север теплых вод Северо-Атлантического течения (САТ) и поступлением холодных вод из моря Лабрадор. Различия летнего (рис. 3а) и зимнего (рис. 3б) полей температуры хорошо заметны в северном полушарии в районе западных пограничных течений и на северных границах антициклонических круговоротов. Заметный рост температуры летом северного полушария наблюдается в экваториальных областях Тихого и Атлантического океанов. В южном полушарии можно отметить заметное падение зимой южного полушария температуры в районе недалеко от мыса Доброй Надежды, где происходит разворот течения мыса Игольного в восточном направлении.

На рис. 4 приведены карты среднегодовой температуры и солёности Мирового океана на горизонте 200 м. В распределении температуры (рис. 4а) хорошо

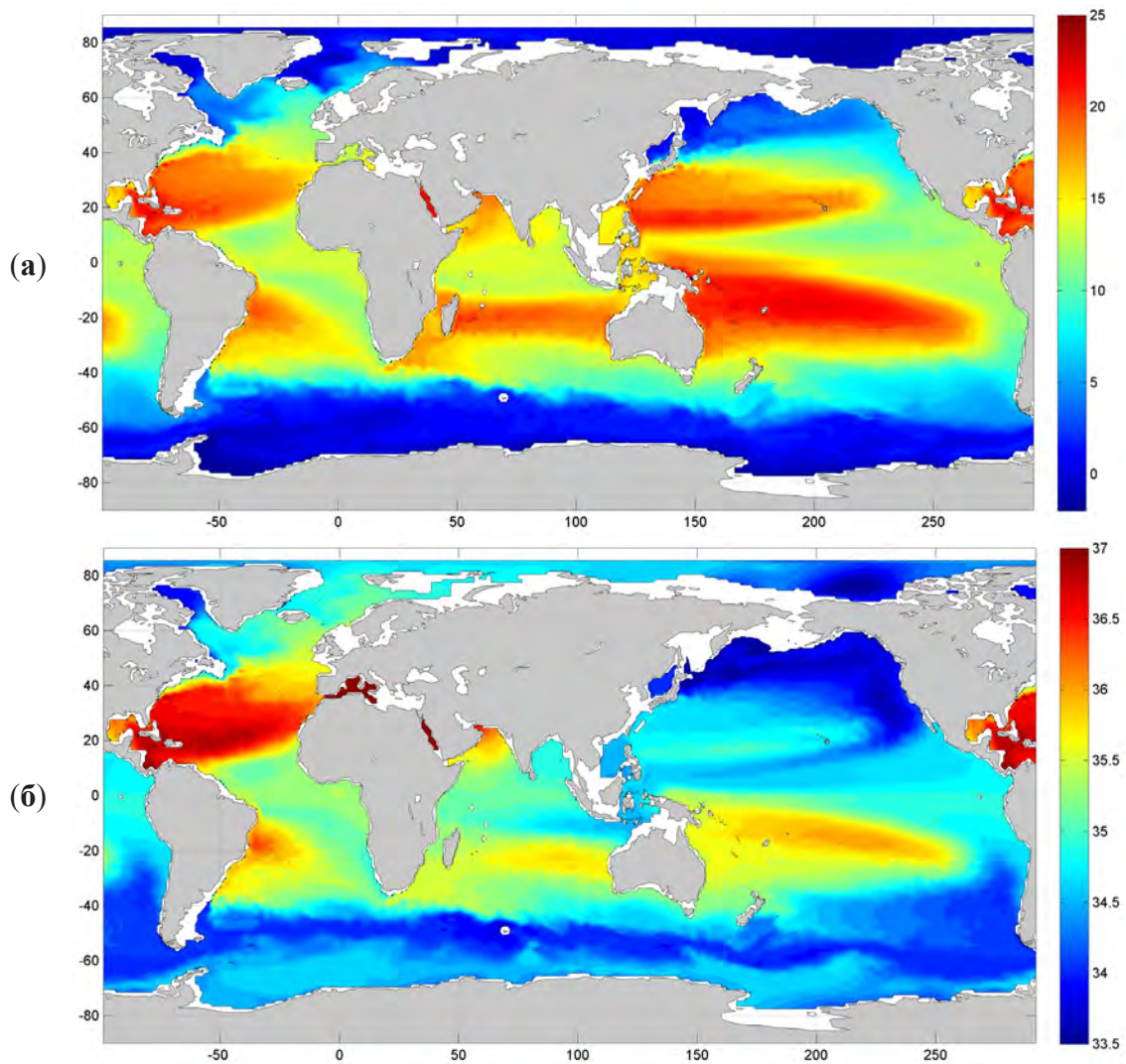


Рис. 4. Среднегодовое поле температуры (а) и солёности (б) Мирового океана на горизонте 200 м по данным АМИГО.

видны субтропические антициклонические круговороты, имеющие в разных океанах близкие значения температуры в центральных областях. Значения солёности в центрах субтропических круговоротов, напротив, существенно различаются от океана к океану (рис. 4б). Относительно низкая солёность северной части Тихого океана является следствием преобладания осадков над испарением. Высокая солёность вод тропической и субтропической Атлантики и Средиземного моря связана с осолонением поверхностных вод, вызванным интенсивным испарением в этих районах. На распределение солёности, кроме потоков влаги с поверхности и процессов перемешивания, существенное влияние оказывает циркуляция вод. В южной части океанов отчетливо выражено Антарктическое циркумполярное течение, положение которого хорошо прослеживается по минимуму солёности. В восточной части Индийского океана немного южнее экватора отчетливо виден язык пониженной солёности, сформировавшийся в результате поступления через Индонезийские проливы вод Тихого океана. Повышенная солёность на севере Атлантического океана связана с распространением теплых и соленых вод Гольфстрима различными ветвями САТ. Часть этих вод поступает затем через Фареро-Шетландский пролив в Арктический бассейн, давая начало Норвежскому течению, другая часть поворачивает на запад к Исландии, формируя течение Ирмингера.

Главной особенностью карт среднегодовой температуры и солёности на горизонте 700 м (рис. 5) является хорошо заметный язык теплых и соленых вод, сформировавшийся в результате переноса СМВ направленным в Атлантический океан придонным течением в Гибралтарском проливе (Филюшкин, Лебедев, Кожелупова, 2017). Сходные по величине высокие значения температуры и солёности на западе Северной Атлантики связаны с опусканием теплых высокосолёных поверхностных вод в субтропическом антициклоническом круговороте. Течение Курошио, в отличие от ярко выраженного Гольфстрима, на глубине 700 м сильно ослаблено, выделяется только в поле температуры (рис. 5а), отсутствуя на карте солёности (рис. 5б). В Индийском океане воды повышенной температуры и солёности наблюдаются в районе Красного моря и Персидского залива. Повышенные значения температуры и солёности в юго-западной части Индийского океана связаны с опусканием поверхностных вод в субтропическом антициклоническом круговороте.

Анализ представленных на рис. 6 карт среднегодовой температуры и солёности Мирового океана на горизонте 1000 м и их сравнение с картами для горизонта 700 м (рис. 5) показывают, что влияние теплых и соленых вод Флоридского течения и Гольфстрима на формирование термохалинных характеристик Северной Атлантики заметно ослабевает с глубиной; в Тихом океане следы течения Курошио в поле температуры становятся едва различимыми (рис. 6а) и полностью отсутствуют в поле солёности (рис. 6б). Воды повышенной температуры и солёности в северо-за-



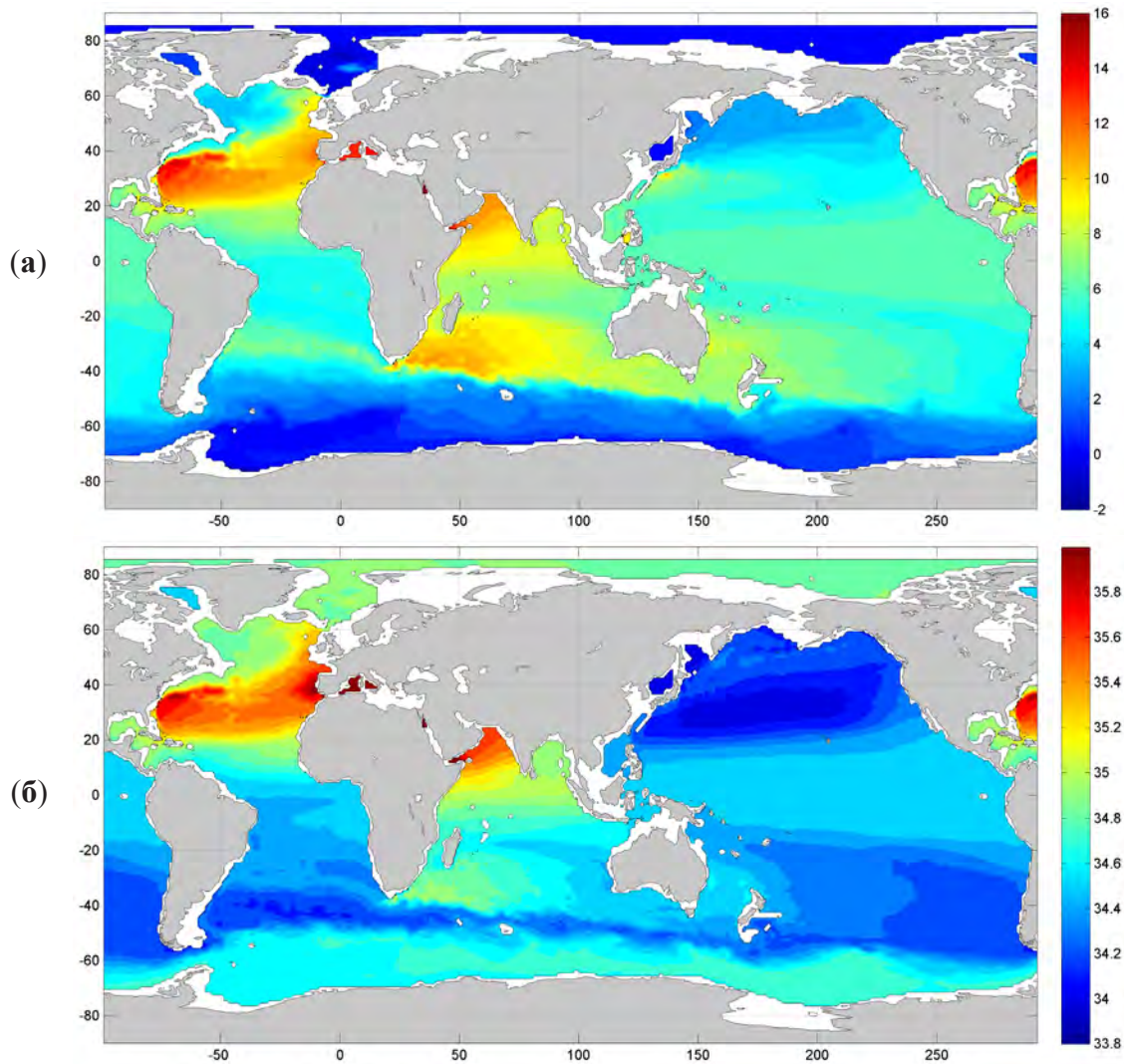


Рис. 5. Среднегодовое поле температуры (а) и солёности (б) Мирового океана на горизонте 700 м по данным АМИГО.

падной части Индийского океана, формирующиеся в районе Красного моря и Персидского залива, начинают уступать по величинам максимальных значений характеристик водам Северной Атлантики, сформировавшимся в районе Гибралтарского пролива. Интенсивность южного субтропического круговорота Индийского океана и температура в его центре близки величинам, наблюдающимся в субтропическом круговороте Северной Атлантики. При этом солёность в центре южного субтропического круговорота Индийского океана, в отличие от Северной Атлантики, оказывается близкой к фоновым значениям. Повышенная солёность, наблюдаемая на западе Северной Атлантики, объясняется распространением вплоть до Саргасова моря языка СМВ на этих глубинах (Филюшкин, Лебедев, Кожелупова, 2017).

Карты температуры и солёности для горизонта 2000 м, последнего из доступных по данным измерений Арго, показаны на рис. 7. На картах хорошо видно, что

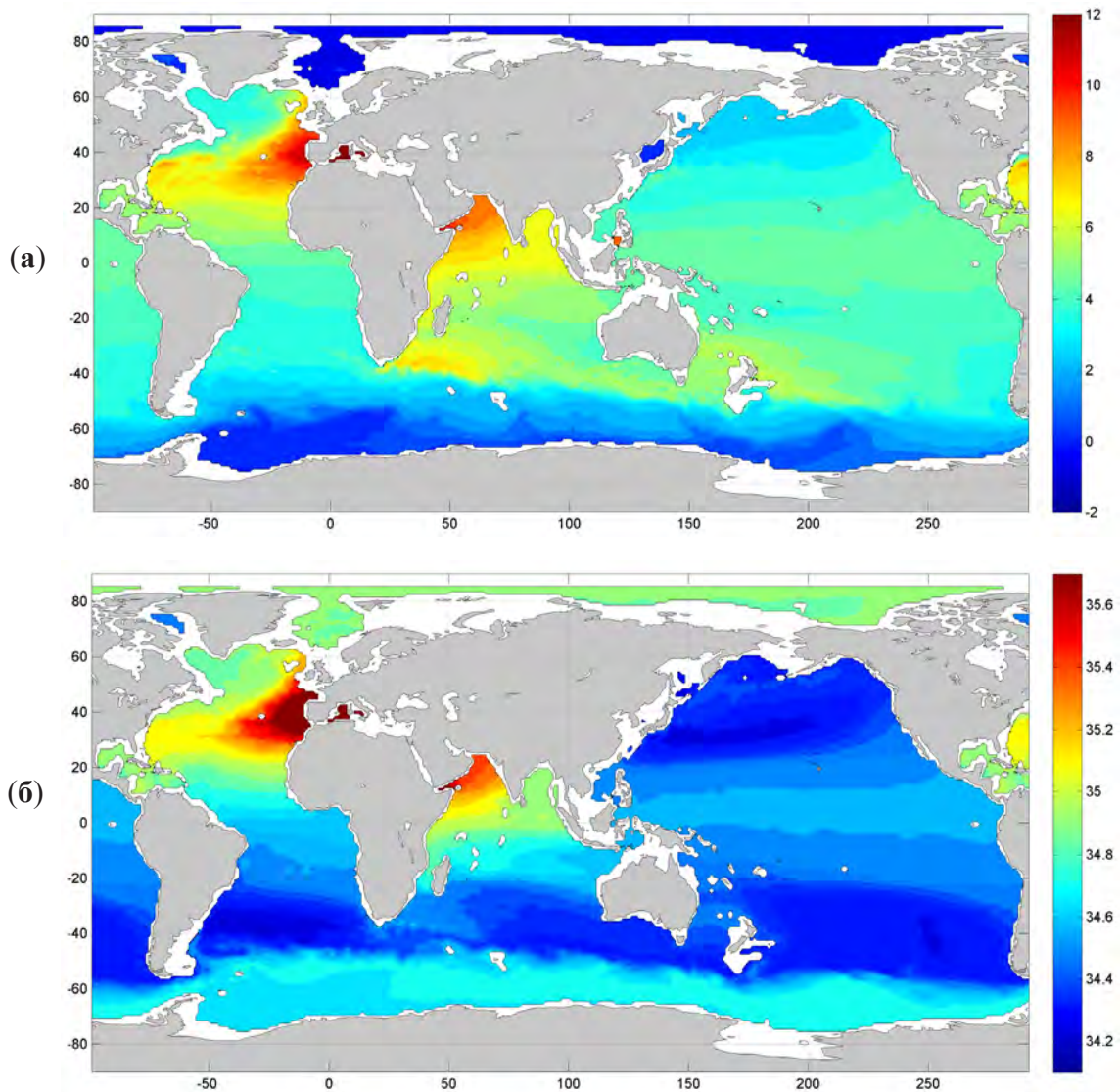


Рис. 6. Среднегодовое поле температуры (а) и солёности (б) Мирового океана на горизонте 1000 м по данным АМИГО.

ореол распространения вод повышенной температуры (рис. 7а) и солёности (рис. 7б), сформировавшихся в Атлантическом океане под влиянием СМВ, расширяется до экваториальной области южного полушария. Воды повышенной солёности распространяются далее на юг вдоль побережья Южной Америки и частично попадают в АЦТ, где их затухающий по мере распространения течения на восток след, хорошо заметный на протяжении всего циркумполярного кольца, начинает исчезать лишь при приближении к проливу Дрейка (рис. 7б). Воды повышенной температуры и солёности в северо-западной и юго-западной частях Индийского океана на глубине 2000 м выражены заметно слабее, чем на вышележащих горизонтах. Тихий океан на глубине 2000 м выглядит практически однородным как по температуре, так и по солёности.



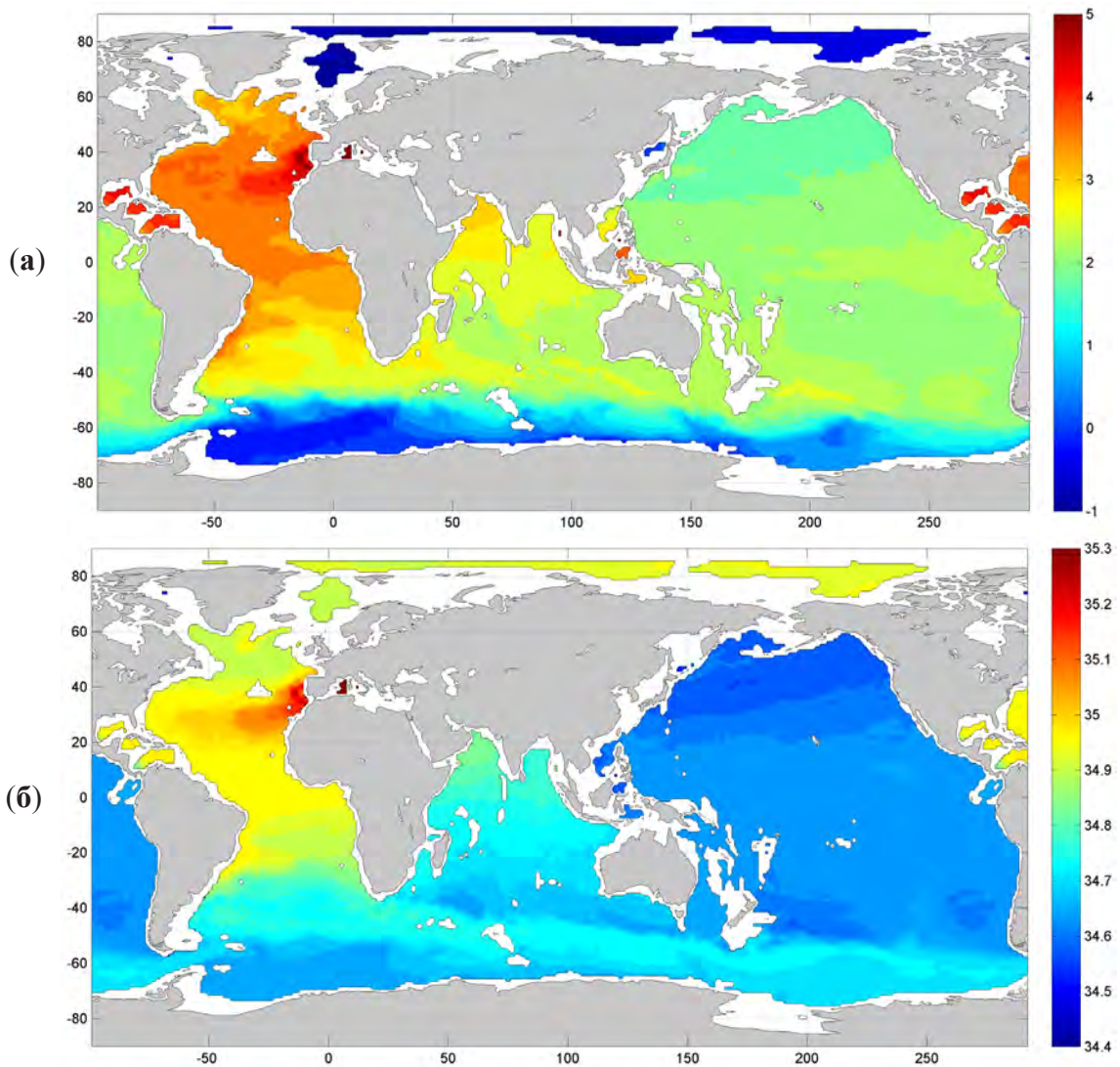


Рис. 7. Среднегодовое поле температуры (а) и солености (б) Мирового океана на горизонте 2000 м по данным АМИГО.

### Заключение

В статье представлены результаты расчетов по разработанной в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН Арго-Модели Исследования Глобального Океана (АМИГО), которая состоит из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования дрейфующих измерителей Арго и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей. Разработанная методика позволяет получать по нерегулярно расположенным данным измерений Арго полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений. Выполненные расчеты представ-

лены ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями на одноградусной сетке и охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. Пространственное разрешение данных в базе составляет 1 градус по долготе и широте, временное – 1 месяц.

Использование Арго-модели АМИГО позволило, с одной стороны, систематизировать случайные наблюдения свободно дрейфующих поплавков Арго с помощью вариационной методики интерполяции наблюдений на регулярную одноградусную сетку, а, с другой стороны, на этой основе произвести сложные расчеты изменчивости расходов и переносов тепла и соли течениями при крупномасштабном водообмене.

В результате расчетов по Арго-модели получились следующие средние значения межокеанского водообмена: перенос из Тихого океана в Индийский составил  $15,4 \pm 3$  Св, водообмен Тихого океана с Арктикой –  $0,63 \pm 0,57$  Св. Полученные величины хорошо согласуются с известными оценками, полученными на основании прямых многолетних измерений.

В работе показано, что Арго-модель, несмотря на одноградусное разрешение, корректно описывает поступление арктической воды в море Лабрадор через Девисов пролив ( $1,46 \pm 0,29$  Св) и средиземноморских вод в Атлантический океан через Гибралтарский пролив ( $1,1 \pm 0,2$  Св). Полученные величины средних расходов в проливах Дейвиса и Гибралтар получились достаточно близкими измеренным среднемноголетним значениям.

Арго-модель позволила получить на основе данных измерений Арго достоверную картину распространения средиземноморских вод в Атлантическом океане на различных глубинах вплоть до горизонта 2000 м. Показана важная роль средиземноморских вод как основного источника тепла и соли на промежуточных глубинах Атлантического океана.

Выполненные расчеты показали, что предложенная методика модельных расчетов океанографических характеристик Мирового океана с использованием данных Арго позволяет существенно улучшить существующие климатические поля температуры и солёности.

Результаты выполненных расчетов, примеры которых приведены в статье, смогут служить основой для изучения и анализа текущего состояния климата Мирового океана и выделения внутриклиматических трендов последнего десятилетия.

### **Благодарности**

Данные Арго были собраны и выложены в свободный доступ международной программой Argo при участии национальных программ (<http://www.argo.ucsd.edu>, <http://argo.jcommops.org>). Программа Argo является частью Глобальной инструментальной системы наблюдений за состоянием океана. Альтиметрическая информация подготовлена при помощи системы обработки

спутниковой альтиметрии Ssalto/Duacs и распространяется через Aviso при поддержке CNES (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>).

Работы по систематизации данных АМИГО выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ для научных организаций № 14-50-00095, анализ характеристик Южного океана поддержан грантом РНФ № 16-17-10149. База данных АМИГО находится в свободном доступе на сервере ИО РАН по адресу <http://argo.ocean.ru/>.

## Литература

- Иванов Ю.А., Лебедев К.В., Саркисян А.С. Обобщенный метод гидродинамической адаптации (ОМЕГА) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1997. Т. 33. № 6. С. 812–818.
- Курносова М.О., Лебедев К.В. Исследование изменчивости переносов в системе Куроисио на 35° с.ш., 147° в.д. по данным поплавков Argo и спутниковой альтиметрии // Докл. АН. 2014. Т. 458. № 2. С. 225–228.
- Лебедев К.В. Среднегодовой климат океана. 2. Интегральные характеристики климата Мирового океана (переносы массы, тепла, солей) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1999. Т. 35. № 1. С. 96–106.
- Лебедев К.В. Арго-Модель Исследования Глобального Океана (АМИГО) // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 186–196.
- Лебедев К.В., Саркисян А.С., Никитин О.П. Сравнительный анализ поверхностной циркуляции Северной Атлантики, воспроизведенной тремя различными методами // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 465–474.
- Саркисян А.С., Никитин О.П., Лебедев К.В. Физические характеристики Гольфстрима как индикатор качества моделирования циркуляции Мирового океана // . . 2016. Т. 471. № 5. С. 595–598.
- Филлюшкин Б.Н., Лебедев К.В., Кожелупова Н.Г. Обнаружение промежуточных средиземноморских вод в Атлантическом океане по наблюдениям поплавков Argo // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 847–857.
- Antonov J.I., Seidov D., Boyer T.P., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R. World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity // S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 2010. 184 p.
- Argo. Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC) // SEANOE. 2000. <http://doi.org/10.17882/42182>.
- Bryden H.L., Candela J., Kinder T.H. Exchange through the Strait of Gibraltar // Prog. Oceanogr. 1994. Vol. 33. P. 201–248.
- Curry B., Lee C.M., Petrie B., Moritz R.E., Kwok R. Multiyear Volume, Liquid Freshwater, and Sea Ice Transports through Davis Strait, 2004–10 // J. Phys. Oceanogr. 2014. Vol. 44. No. 4. P. 1244–1266.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 553–597.



- Ducet N., Le Traon P.Y., Reverdin G.* Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2 // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. No. C8. P. 19477–19498.
- Furue R., Takatama K., Sasaki H., Schneider N., Nonaka M., Taguchi B.* Impacts of sea-surface salinity in an eddy-resolving semi-global OGCM // *Ocean Modelling.* 2018. Vol. 122. P. 36–56. doi:10.1016/j.ocemod. 2017.11.004.
- Lebedev K.V., DeCarlo S., Hacker P.W., Maximenko N.A., Potemra J.T., Shen Y.* Argo Products at the Asia-Pacific Data-Research Center // *Eos Trans. AGU.* 2010. Vol. 91. No. 26. Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract IT25A-01.
- Lebedev K.V., Yoshinari H., Maximenko N.A., Hacker P.W.* YoMaHa'07: Velocity data assessed from trajectories of Argo floats at parking level and at the sea surface // *IPRC Technical Note.* 2007. No. 4(2). 16 p.
- Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R.* World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature // S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 2010. 184 p.
- Roach A.T., Aagaard K., Pease C.H., Salo S.A., Weingartner T., Pavlov V., Kulakov M.* Direct measurements of transport and water properties through the Bering Strait // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100, N C9. P. 18443–18457.
- Sasaki Y.N., Schneider N., Maximenko N., Lebedev K.* Observational evidence for propagation of decadal spiciness anomalies in the North Pacific // *Geophys. Res. Lett.* 2010. Vol. 37. L07708, doi:10.1029/2010GL042716.
- Soto-Navarro J., Criado-Aldeanueva F., García-Lafuente J., Sánchez-Román A.* Estimation of the Atlantic inflow through the Strait of Gibraltar from climatological and in situ data // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C10023. doi:10.1029/2010JC006302.
- Sprintall J., Wijffels S.E., Molcard R., Jaya I.* Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006 // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 144, C07001. doi:10.1029/2008JC005257.

## THE ARGO-BASED MODEL FOR INVESTIGATION OF THE GLOBAL OCEAN: A SYNTHESIS OF OBSERVATIONS AND NUMERICAL MODELING

K.V. Lebedev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [KLebedev@ocean.ru](mailto:KLebedev@ocean.ru)*

Submitted 15.11.2017, accepted 25.12.2017

We present the newly developed at the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences Argo-Based Model for Investigation of the Global Ocean (AMIGO), which consists of a block for variational interpolation of the profiles of drifting Argo floats to a regular grid and a block for model hydrodynamic adjustment of variationally interpolated fields. Such a technique makes it possible to obtain a complete set of oceanographic characteristics from irregularly located Argo measurements: temperature, salinity, density, and current velocity. The calculations cover the 10-year period from 2005 to 2014; the data are represented as monthly, seasonal, and annual means and climatological fields with the one degree spatial resolution.

**Keywords:** ocean, modeling, climate, circulation, ocean currents, transports, Argo floats.

## References

- Antonov J.I., Seidov D., Boyer T.P., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R., World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity, S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010, 184 p.
- Argo. Argo float data and metadata from Global Data Assembly Center (Argo GDAC), *SEANOE*, 2000, <http://doi.org/10.17882/42182>.
- Bryden H.L., Candela J., Kinder T.H., Exchange through the Strait of Gibraltar, *Prog. Oceanog.*, 1994, Vol. 33, pp. 201–248.
- Curry B., Lee C.M., Petrie B., Moritz R.E., Kwok R., Multiyear Volume, Liquid Freshwater, and Sea Ice Transports through Davis Strait, 2004–10, *J. Phys. Oceanogr.*, 2014, Vol. 44, No. 4, pp. 1244–1266.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 2011, Vol. 137, pp. 553–597.
- Ducet N., Le Traon P.Y., Reverdin G., Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2, *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol. 105, No. C8, pp. 19477–19498.
- Filyushkin B.N., Lebedev K.V., Kozhelupova N.G., Detection of intermediate Mediterranean waters in the Atlantic Ocean by ARGO floats data, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 6, pp. 763–771.
- Furue R., Takatama K., Sasaki H., Schneider N., Nonaka M., Taguchi B., Impacts of sea-surface salinity in an eddy-resolving semi-global OGCM, *Ocean Modelling*, 2018, Vol. 122, pp. 36–56, doi:10.1016/j.ocemod.2017.11.004.
- Ivanov Yu.A., Lebedev K.V., Sarkisyan A.S., Generalized hydrodynamic adjustment method (GHDAM), *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1997, Vol. 33, No. 6, pp. 752–757.
- Kurnosova M. O., Lebedev K.V., Study of transport variations in the Kuroshio extension system at 35°N, 147°E based on the data of Argo floats and satellite altimetry, *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 458, No. 1, pp. 1154–1157.
- Lebedev K.V., An argo-based model for investigation of the Global Ocean (AMIGO), *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 172–181.
- Lebedev K.V., Average annual climate of the ocean. Part 2: Integral characteristics of the world ocean climate (mass, heat, and salt transports), *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1999, Vol. 35, No. 1, pp. 87–96.
- Lebedev K.V., DeCarlo S., Hacker P.W., Maximenko N.A., Potemra J.T., Shen Y., Argo Products at the Asia-Pacific Data-Research Center, *EOS Trans. AGU*, 2010, Vol. 91, No. 26, Ocean Sci. Meet. Suppl., Abstract IT25A-01.
- Lebedev K.V., Sarkisyan A.S., Nikitin O.P., Comparative analysis of the North Atlantic surface circulation reproduced by three different methods, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 410–417.
- Lebedev K.V., Yoshinari H., Maximenko N.A., Hacker P.W., Velocity data assessed from trajectories of Argo floats at parking level and at the sea surface, *IPRC Technical Note*, 2007, No. 4(2), 16 p.

- Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Johnson D.R.*, World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature, S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2010, 184 p.
- Roach A.T., Aagaard K., Pease C.H., Salo S.A., Weingartner T., Pavlov V., Kulakov M.*, Direct measurements of transport and water properties through the Bering Strait, *J. Geophys. Res.*, 1995, Vol. 100, N C9, pp. 18443–18457.
- Sarkisyan A.S., Nikitin O.P., Lebedev K.V.*, Physical characteristics of the Gulf Stream as an indicator of the quality of large-scale circulation modeling, *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 471, No. 2, pp. 1288–1291.
- Sasaki Y.N., Schneider N., Maximenko N., Lebedev K.*, Observational evidence for propagation of decadal spiciness anomalies in the North Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 2010, Vol. 37, L07708, doi:10.1029/2010GL042716.
- Soto-Navarro J., Criado-Aldeanueva F., García-Lafuente J., Sánchez-Román A.*, Estimation of the Atlantic inflow through the Strait of Gibraltar from climatological and in situ data, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, C10023, doi:10.1029/2010JC006302.
- Sprintall J., Wijffels S.E., Molcard R., Jaya I.*, Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 144, C07001, doi:10.1029/2008JC005257.

**МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРОГРАММЫ ГЛОБАЛЬНЫХ  
ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И УЧАСТИЕ В НИХ РОССИИ**  
**О.П. Никитин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова Росгидромета,  
Россия, 119034, Москва, Кропоткинский пер, 6

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

e-mail: [opnikitin@mail.ru](mailto:opnikitin@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 15.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Рассмотрены международные программы, в рамках которых систематически выполняются глобальные контактные океанографические измерения: Глобальная дрефтерная программа (GDP) отслеживания течений в приповерхностном перемешанном слое Мирового океана, а также измерений температуры воды на поверхности и приводного атмосферного давления вдоль траекторий буев (дрифтеров), свободно дрейфующих с поверхностными океанскими течениями; программа ARGO глобальных измерений вертикальных профилей температуры и солености, а также течений на заданной глубине дрейфа с помощью сети ныряющих буев; программа GO-SHIP повторных гидрологических измерений вдоль системы океанографических разрезов, осуществляемая с помощью опускаемых зондов с научно-исследовательских судов; программа VOS судовых добровольных наблюдений за гидрометеорологическими параметрами и состоянием поверхности океана и приводной атмосферы; программа OceanSITES долгосрочных наблюдений на глобальной сети закоренных буйковых станций за разнообразными океанографическими параметрами на поверхности океана и его глубинах и программа GLOSS наблюдений за уровнем Мирового океана на сети береговых станций. Описано участие российских организаций океанографического профиля в перечисленных программах наблюдений – наблюдений, образующих наземно-океаническую подсистему Глобальной системы наблюдений за Мировым океаном.

**Ключевые слова:** глобальная система наблюдений за Мировым океаном, национальные координаторы, глобальная дрефтерная программа, программа ARGO, программа GO-SHIP, программа VOS, программа OceanSITES, программа GLOSS

### **Введение**

С начала 1990-х годов в рамках ряда крупных программ международным сообществом проводились масштабные работы по созданию глобальной инструментальной системы наблюдений за Мировым океаном (*англоязычное название системы – Global Ocean Observing System (GOOS); русскоязычный эквивалент этого названия – Глобальная система наблюдений за океаном (ГСНО).* (Веб-сайт – <http://www.goosocean.org>), которую планируется поддерживать и развивать на постоянной основе. С помощью ГСНО осуществляется мониторинг состояния Мирового океана и приводной атмосферы и отслеживаются изменения в глобальном масштабе. Данные ГСНО используются для расширения знаний о Мировом океане, понимания происходящих в нем процессов, диагноза текущего

и прогноза будущего состояния, а также для многих практических целей. Участие государств в ГСНО осуществляется на добровольной основе.

Основой для участия России в ГСНО являются Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 г., Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г., Федеральная целевая программа «Мировой океан», а также задачи регулярного океанографического и гидрометеорологического обеспечения морской деятельности России (Бубынин, Горлов, Толкачев, 2013). Координация участия России в ГСНО осуществляется через Межправительственную океанографическую комиссию (МОК) ЮНЕСКО (<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/ioc-oceans>), Всемирную метеорологическую организацию (ВМО) и Межведомственную национальную океанографическую комиссию при Министерстве образования и науки России, которая определяет общую политику участия российских организаций в ГСНО и утверждает национальных координаторов и представителей России в ГСНО.

Обновленный в 2017 г. перечень национальных координаторов и представителей России в программах и рабочих органах ГСНО приведен в табл. 1.

Национальные представители участвуют в организуемых МОК и ВМО сессиях национальных представителей (экспертов) и регулярно готовят национальные отчеты (Пример такого отчета см. по адресу: ([http://www.ioc-unesco.org/index.php?option=com\\_oe&task=viewDocumentRecord&docID=19566](http://www.ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=19566)). В обязанности национального представителя входят: координация и расширение национального участия в соответствующей программе ГСНО, выявление проблем и участие в их решении, обеспечение передачи данных в международные центры данных, работа в соответствии с материалами и документами, вырабатываемыми МОК и ВМО, решениями сессий национальных экспертов, планами действий на межсессионный период.

В состав ГСНО входят глобальные сети наблюдений, использующие поверхностные дрейфующие буи, профилирующие (ныряющие) буи ARGO, научно-исследовательские суда и суда, добровольно производящие попутные гидрометеорологические наблюдения, прибрежные и глубоководные заякоренные буйковые станции, береговые станции слежения за уровнем морей и океанов. Перечисленные платформы наблюдений образуют глобальную наземно-океаническую подсистему ГСНО. Большую роль в ГСНО играют специализированные искусственные спутники Земли, с которых производятся дистанционные наблюдения за поверхностью Мирового океана с помощью альтиметров, радиометров, скаттерометров, фоторегистраторов и других технических средств. Такие наблюдения составляют космическую подсистему ГСНО. Помимо глобальных подсистем в состав ГСНО входят также 15 региональных подсистем наблюдений, функционирующих главным образом в рамках региональных альянсов ГСНО (*Regional Alliances (GRAs)*, [http://www.goocean.org/?option=com\\_content&view=article&id=22&Itemid=36](http://www.goocean.org/?option=com_content&view=article&id=22&Itemid=36)). Последние созданы для выполнения совместных океанографических наблюдений странами, имеющими общие интересы в определенных прибрежных морских районах, прилегающих к этим странам.



Таблица 1. Российские представители в программах и рабочих органах ГСНО

<b><i>Программы, органы ГСНО</i></b>	<b><i>Национальные представители России</i></b>
Глобальная система наблюдений за океаном (МОК/ВМО)	<b><i>Постнов Александр Александрович</i></b> Заместитель директора Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова Росгидромета, <a href="mailto:alexander.postnov@mail.ru">alexander.postnov@mail.ru</a>
Совместная техническая комиссия ВМО-МОК по океанографии и морской метеорологии	<b><i>Смоляницкий Василий Маркович</i></b> Заведующий лабораторией Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидромета, <a href="mailto:vms@aari.nw.ru">vms@aari.nw.ru</a>
Группа по сотрудничеству в использовании буев (МОК/ВМО)	<b><i>Ашик Игорь Михайлович</i></b> Заместитель директора Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидромета, <a href="mailto:ashik@aari.ru">ashik@aari.ru</a>
Глобальная система наблюдений за уровнем моря (МОК)	<b><i>Никитин Олег Петрович</i></b> (национальный координатор) Заведующий лабораторией Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова Росгидромета, <a href="mailto:opnikitin@mail.ru">opnikitin@mail.ru</a> <b><i>Ашик Игорь Михайлович</i></b> (измерения уровня в арктических морях) Заместитель директора Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидромета, <a href="mailto:ashik@aari.ru">ashik@aari.ru</a> <b><i>Михайлов Николай Николаевич</i></b> (международный обмен данными и информацией об уровне моря) Начальник Центра океанографических данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Росгидромета, <a href="mailto:nodc@meteo.ru">nodc@meteo.ru</a>
Международная сеть буев-профилографов АРГО	<b><i>Ставров Константин Георгиевич</i></b> Начальник Научно-исследовательского центра Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института Минобороны России, <a href="mailto:rsgningi@navy.ru">rsgningi@navy.ru</a> <b><i>Волков Юрий Николаевич</i></b> Директор Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института Росгидромета, <a href="mailto:hydromet@mail.ru">hydromet@mail.ru</a>
Программа добровольных наблюдений с судов (МОК/ВМО)	<b><i>Фахрутдинов Фарих Равильевич</i></b> Научный сотрудник Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова Росгидромета, <a href="mailto:adm@oceanography.ru">adm@oceanography.ru</a>

Ниже будут кратко рассмотрены международные программы, в рамках которых систематически выполняются глобальные контактные измерения разнообразных гидрометеорологических характеристик (наземно-океаническая подсистема ГСНО). Такие программы курирует совместная ВМО-МОК техническая комиссия по океанографии и морской метеорологии JCOMM (*WMO-IOC Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM)*, <http://www.jcomm.info>), которая была создана в 1999 г. для координации и интеграции систем морских наблюдений, управления данными и обслуживания существующих систем наблюдений.

### Глобальная дрейфтерная программа

Массовые наблюдения за поверхностными течениями Мирового океана с помощью специально разработанных для этой цели свободно дрейфующих лагранжевых океанографических буев (дрейфтеров), отслеживаемых со спутников, проводятся на протяжении уже почти четырех последних десятилетий. Такие стандартизированные буи имеют небольшой поверхностный поплавок с термистором и передатчиком (для передачи данных посредством спутниковой системы связи), а также подвешенный к поплавку на тросе подводный парус-якорь в виде цилиндра высотой в несколько метров с центром на глубине 15 м (Lumpkin, Pazos, 2007). Помимо скорости и направления течения в приповерхностном слое измеряется также температура на поверхности океана, а на более чем 50% буев – и приводное атмосферное давление с помощью дополнительно устанавливаемого на поплавке барометра.

Планового уровня в ГСНО – не менее чем 1250 одновременно дрейфующих буев, более или менее равномерно распределенных по океану, – дрейфтерная сеть наблюдений достигла в 2005 г. С целью поддержания этой сети ежегодно в различных частях Мирового океана выполняются запуски дрейфтеров до нескольких сотен экземпляров в год. Запуски производятся в рамках международной Глобальной дрейфтерной программы (Global Drifter Program – GDP) ([http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdp\\_objectives.php](http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdp_objectives.php)) главным образом с научно-исследовательских и добровольных судов, а также частично с самолетов. На рис. 1 в качестве примера показано расположение дрейфтеров в Мировом океане 11 декабря 2017 г.

Как следует из рис. 1, в настоящее время Россия не принимает участия в GDP. В прошлом участие России в GDP ограничивалось эпизодическими запусками дрейфтеров зарубежного производства, при этом российский вклад заключался в предоставлении научно-исследовательских судов как средств доставки дрейфтеров к точкам запуска. Поскольку эксплуатация судов обходится очень дорого, то дрейфтеры (включая передачу данных через иностранные спутниковые системы) в рамках GDP предоставлялись и впредь могут быть предоставлены бесплатно.

Время от времени в исключительную экономическую зону (ИЭЗ) и даже в территориальные воды РФ заплывают дрейфующие буи иностранного производства (Никитин, Касьянов, 2016). Согласно рис. 1, в декабре 2017 г. в Баренцевом,

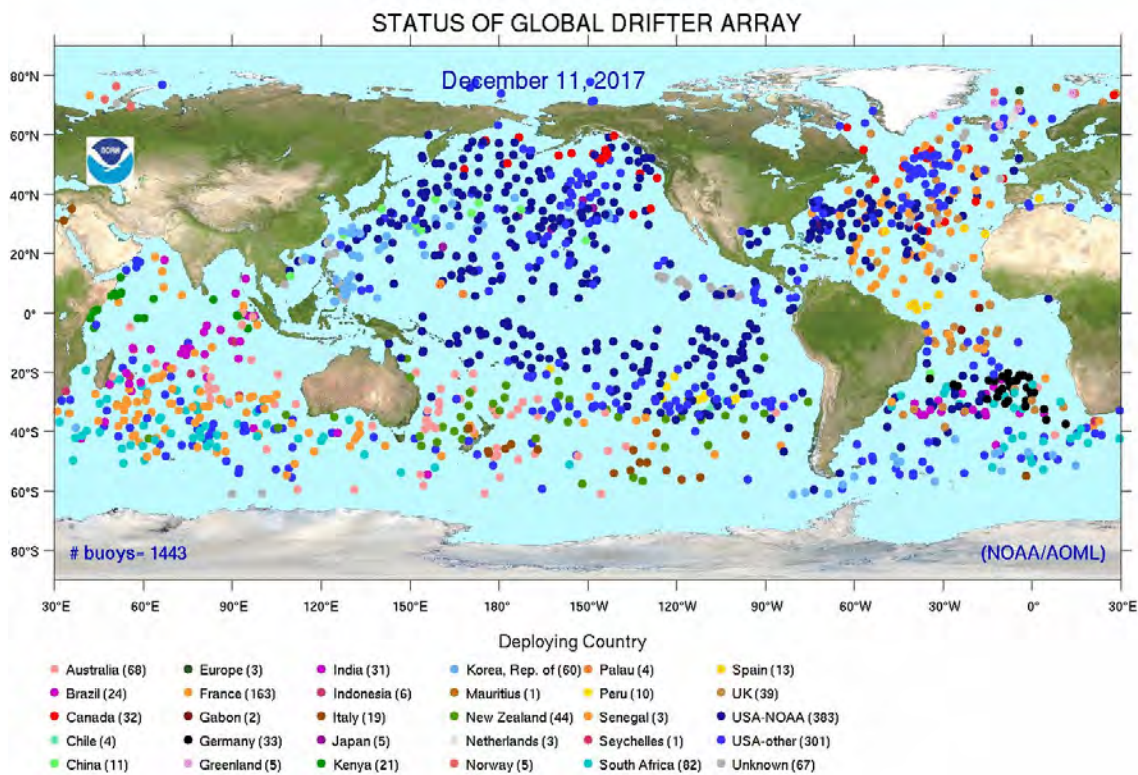


Рис. 1. Текущее положение 1443 дрейфтеров GDP в Мировом океане 11 декабря 2017 г. и перечень стран, участвовавших в их запусках ([http://www.aoml.noaa.gov/phod/graphics/dacdata/globpop\\_countries.gif](http://www.aoml.noaa.gov/phod/graphics/dacdata/globpop_countries.gif)).

Карском, Охотском и Беринговом морях вблизи российских берегов дрейфовали буи, запущенные ранее США и Европейским союзом. Зарубежные собственники таких буев не запрашивают необходимых заблаговременных разрешений от Министерства образования и науки РФ на проведение морских наблюдений в ИЭЗ РФ, мотивируя это тем, что пересечение границ ИЭЗ РФ буями, свободно дрейфующими вместе с течениями, происходит ненамеренно. При этом нередко оперативные данные дрейфтерных наблюдений, выполненных в ИЭЗ РФ, не попадают в Глобальную систему телесвязи (ГСТ) ВМО и не становятся поэтому общедоступными, поскольку собственники буев не присваивают своим буям соответствующие коды ВМО (таких кодов ВМО в декабре 2017 г. в Баренцевом море в ИЭЗ РФ не имели дрейфтеры с номерами 145848 и 145888, запущенные годом ранее в Норвежском море с норвежского исследовательского судна). Отсроченные данные многих дрейфтеров, запускавшихся ранее в Черном море в ряде программ и дрейфовавших вблизи кавказского побережья России, так и не оказались впоследствии в открытом доступе в зарубежных базах данных. Эта проблема требует решения с привлечением экспертов МОК ЮНЕСКО по морскому праву.

Ситуация с дрейфтерами улучшилась после возвращения Крыма в состав РФ. Севастопольская фирма «Марлин-Юг» (в настоящее время ООО «Марлин-Юг» находится в Ростовской области РФ (<http://marlin-yug.com/ru/home>)) давно наладила

производство качественных дрейфтеров стандарта GDP, которые закупаются рядом стран. Недостатком является тот факт, что данные с дрейфтеров «Марлин-Юг» передаются только через зарубежные спутниковые системы Argos или Iridium, что в последнее время является препятствием для получения разрешения Министерства образования и науки РФ на запуск этих дрейфтеров в ИЭЗ РФ. Важно наладить передачу дрейфтерных данных посредством российской спутниковой системы «Гонец».

Систематические наблюдения с помощью дрейфтеров в морях, примыкающих к России, не производились и поэтому в отличие от большинства акваторий Мирового океана эти моря (за исключением в некоторой степени Черного и Японского морей) слабо охвачены дрейфтерными наблюдениями. В рамках ряда отечественных проектов вне GDP были выполнены эпизодические дрейфтерные наблюдения. Например, с целью получения натуральных данных для решения задач целевой программы «Создание системы оперативного прогнозирования распространения аварийных разливов нефти в море» в июле-августе 2013 г. с НИС «Профессор Мультиановский» был произведен запуск 20-ти буюв фирмы «Марлин-Юг» в Охотском море, дрейфовавших в нем по январь 2014 г. Результаты более ранних наблюдений за поверхностными течениями и дрейфом льда с помощью буюв «Марлин-Юг» в Охотском море в период 2008–2011 гг. приведены в статье (Tambovsky, Bobkov, 2013). Однако данные подобных наблюдений в отличие от данных GDP, как правило, не находятся в открытом доступе.

### Программа ARGO

Глобальная сеть автономных ныряющих буюв ARGO (рис. 2), свободно дрейфующих с течениями и передающих данные измерений через спутники при всплытии на поверхность океана, считается ключевым компонентом ГСНО. Планового значения – не менее 3000 одновременно дрейфующих буюв ARGO в Мировом океане – эта сеть достигла в 2007 г. Впоследствии плановое число увеличилось до 3800. Чтобы поддерживать такую постоянно действующую сеть ежегодно требуется запускать около 800 новых буюв ARGO. Данные программы ARGO общедоступны (<http://www.argo.ucsd.edu>).

Главное назначение буюв ARGO – измерение вертикальных профилей температуры и электропроводности (солености) воды при подъеме от стандартной глубины 2000 м (в открытом океане) до поверхности. Дискретность измерений каждого буюа в большинстве случаев составляет 10 суток. После дрейфа в течение ~ 9 суток на так называемой глубине парковки, составляющей для открытого океана 1000 м, роботизированный буй ARGO погружается на глубину 2000 м, с которой начинает медленный подъем со скоростью ~ 10 см/с в течение ~ 6 часов и профилирование. На поверхности океана буй ARGO находится от 6 до 12 часов, в течение которых происходит передача данных на спутники, и потом происходит погружение на глубину парковки. Буй ARGO рассчитан на 150 таких циклов (~ 4 года).

С помощью буюв ARGO также оцениваются характеристики течений на глубине дрейфа и на поверхности. На ряде буюв ARGO дополнительно измеряются



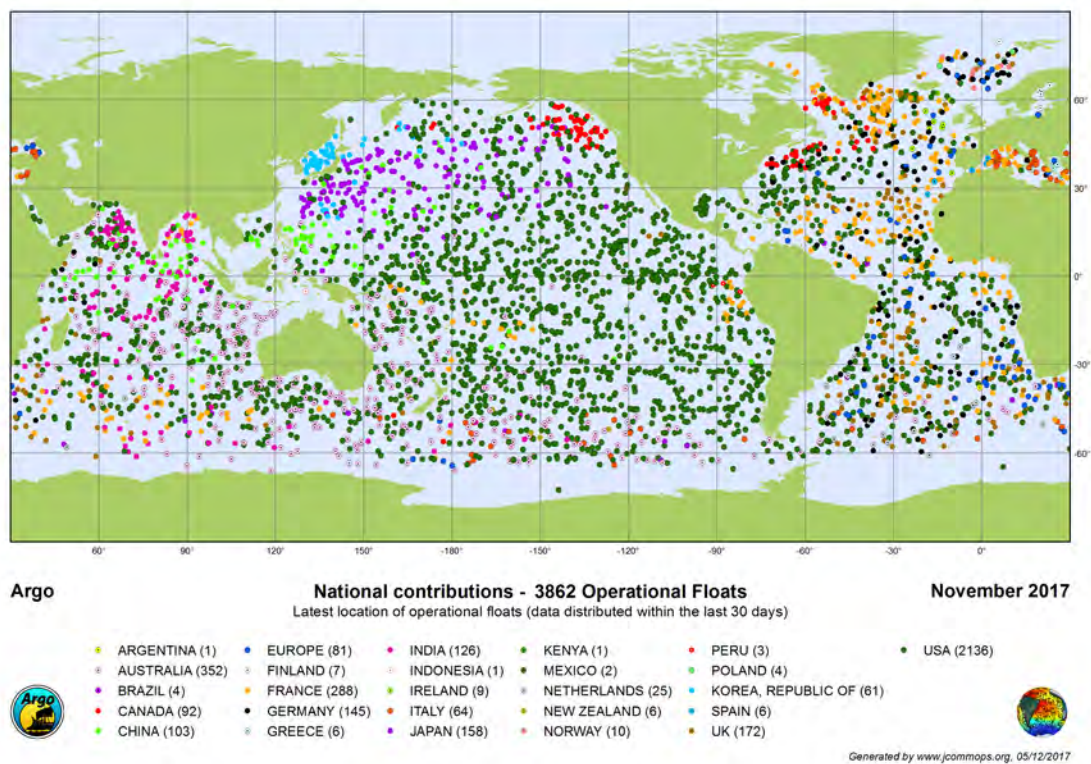


Рис. 2. Положение 3862 буев ARGO в Мировом океане в ноябре 2017 г. и перечень стран, участвовавших в их запусках (<http://argo.jcommops.org>).

вертикальные профили некоторых гидрохимических, гидрооптических и гидробиологических характеристик океана.

В некоторых регионах могут быть заданы другие параметры измерений. Например, в декабре 2017 г. в Черном море на глубине 200 м дрейфовали 10 буев ARGO, которые с дискретностью около 5 суток опускались для измерения вертикальных профилей заданных характеристик на глубину 1000 или 1500 м. Еще один буй ARGO дрейфовал на глубине 1000 м и с дискретностью 10 часов, начиная с глубины дрейфа, измерял профили температуры и солености, а также биогеохимических характеристик в верхнем километровом слое. Эти ARGO-измерения финансировались Европейским союзом.

Один из упомянутых буев ARGO на момент написания настоящих строк находился вблизи границы российских территориальных вод в районе Новороссийска. Как и в случае поверхностных дрейфтеров, размещение буев ARGO во внутренних морях должно осуществляться на основе региональной кооперации и соответствующих соглашений, поскольку такие буи будут неизбежно пересекать ИЭЗ и, возможно, территориальные воды прибрежных государств, нарушая их суверенитет.

В настоящее время Россия не принимает участия в программе ARGO (рис. 2). Ранее образованный в ДВНИГМИ Росгидромета российский центр ARGO (<http://rus.ferhri.ru/argo>) давно перестал функционировать.

Проект отечественного варианта буя ARGO, позволяющий в отличие от зарубежного выполнять измерения, как при подъеме, так и при погружении буя,



разработан в Институте океанологии РАН и получен патент (Островский, Леденев, Швоев, 2017).

В силу мелководности многих морей, окружающих Россию, а также с целью гидрологических зондирований в шельфовых областях представляется важной разработка усовершенствованного буя ARGO с автоматическим ограничением глубины погружения в зависимости от показаний встроенного в буй эхолота и включения этих показаний в программу передачи данных наблюдений, а также с возможностью обратной связи с буюм ARGO для изменения параметров его работы (например, глубины дрейфа). Существовавшая ранее проблема с энергообеспечением длительно работающих автономных приборов, не позволявшая использовать встроенные эхолоты, постепенно уходит по причине быстрого развития технологий создания все более энергоемких батарей.

### Программа GO-SHIP

Важной подсистемой ГСНО является также программа измерений вдоль океанографических разрезов GO-SHIP (Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program) (<http://www.go-ship.org>), осуществляемая с помощью опускаемых гидрологических зондов с научно-исследовательских судов (НИС). При этом измеряются физические, химические и биологические параметры всей водной толщи от поверхности до дна и от берега до берега. Большую ценность имеют данные измерений температуры и солености ниже 2000 м – штатной глубины погружения профилирующих буюв ARGO (подсчитано, что глубинам ниже 2000 м соответствует 52% объема Мирового океана). Для измерения профиля скорости морского течения на судах в настоящее время широко используется акустический доплеровский измеритель течения (ADCP), позволяющий также определять направление и при определенных условиях абсолютную скорость течения. Данные программы GO-SHIP доступны без ограничений.

Система разрезов была в основном сформирована в 1990-х годах в период глобального эксперимента WOCE (World Ocean Circulation Experiment). После WOCE было принято решение о выполнении повторных измерений вдоль этих разрезов примерно каждое десятилетие с целью выявления долговременных крупномасштабных изменений физических и биогеохимических параметров всей водной толщи Мирового океана и определения причин таких изменений.

Россия не принимает участия в программе GO-SHIP (рис. 3). Как уже отмечалось, эксплуатация судов обходится очень дорого, достигая 1–2 млн. руб. в сутки во время рейса. В связи с резким сокращением государственного финансирования отечественный научно-исследовательский флот, состоявший ранее из сотен НИС, в постсоветской России пришел в кризисное состояние (<https://refdb.ru/look/3720694-pall.html>). В значительной мере НИС стали использоваться в коммерческих или круизных целях. В связи с этим на ряде НИС полностью или частично было демонтировано палубное оборудование (лебедки, кран-балки и др.), лабораторные помещения были приспособлены для размещения грузов.

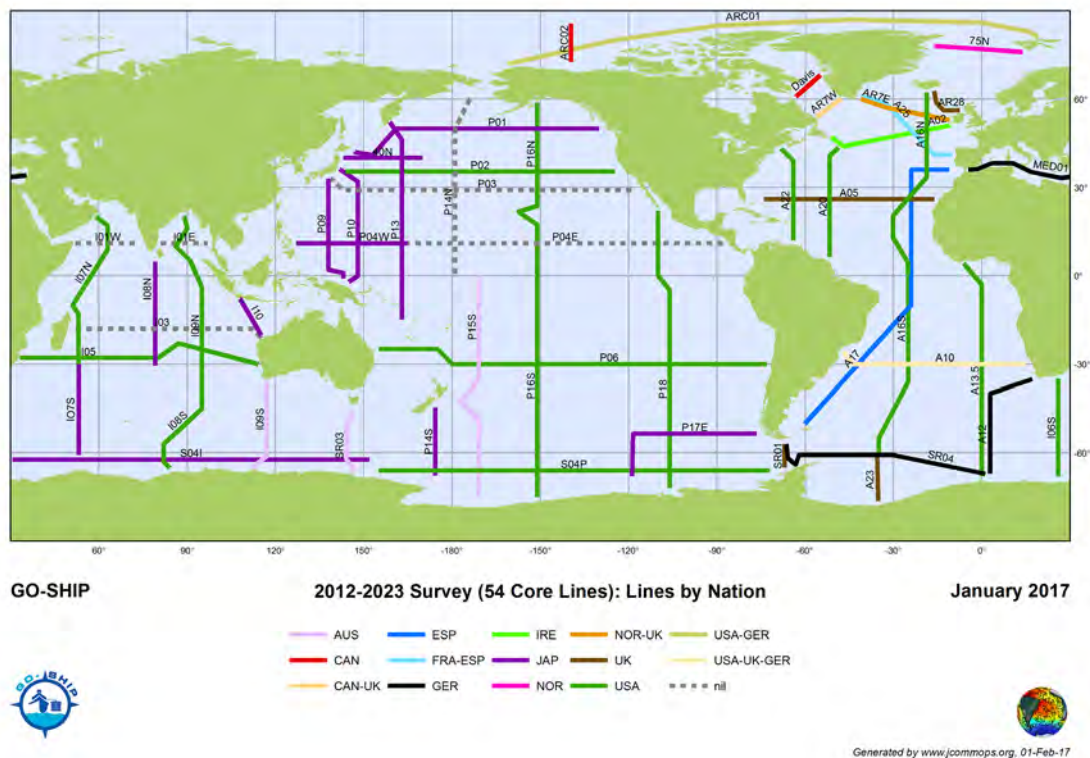


Рис. 3. Положение океанографических разрезов в Мировом океане, вдоль которых в 2012–2023 гг. должны быть выполнены гидрологические измерения по программе GO-SHIP, и перечень стран, участвующих в реализации этой программы ([http://www.go-ship.org/RefSecs/goship\\_ref\\_secs.html](http://www.go-ship.org/RefSecs/goship_ref_secs.html)).

С каждым годом усугубляется старение НИС и возрастает стоимость их ремонта, часть судов приходится выводить из эксплуатации из-за недостатка бюджетных средств. Средний возраст НИС в настоящее время превышает 30 лет. В постсоветской России было введено в строй, по-видимому, только три новых НИС: «Акварин» в 2007 г. (водоизмещение 267 т, «Южморгеология»), «Академик Трешников» в 2012 г. (водоизмещение 12701 т, АНИИ Росгидромета) и «Янтарь» в 2015 г. (водоизмещение 5230 т, ВМФ России).

Все последние годы все еще многочисленные океанографические работы на НИС РАН, Росгидромета, Росрыболовства и Роснедра проводились в основном на морях, прилегающих к России, в значительной мере по заказам нефтегазовых компаний и международным контрактам. При этом судовые режимные океанографические наблюдения на морях России (вековые разрезы и регулярные стандартные съемки), финансировавшиеся ранее государством, в значительной мере оказались свернутыми. Резкое сокращение госбюджетного финансирования в 2016 г. на отраслевую науку в целом и почти на треть на экспедиционные исследования привело к тому, что прервались на год (с июня 2016 по май 2017 г.) ежемесячные гидрологические измерения на знаменитом стандартном вековом разрезе «Кольский меридиан» Баренцева моря, начатые в 1900 г. и выполнявшиеся без существенных пропусков ежемесячно или почти ежемесячно с 1945 г.

Если в советское время судовые океанографические исследования выполнялись упомянутыми выше ведомствами, а также Гидрографической службой ВМФ России во всех районах Мирового океана и по сравнению с другими странами производили впечатление своей многочисленностью, то в настоящее время дальние морские экспедиции выполняются только эпизодически и носят несистемный характер. Регулярно осуществляются рейсы НИС ААНИИ в Антарктику, где постоянно работают российские полярные станции, однако проведение попутных гидрологических работ на постоянных разрезах в открытом океане не является задачей института. По-видимому, единственным исключением являются ежегодные рейсы судов Института океанологии РАН в Атлантический океан, в период которых уже много лет до трех раз в год проводятся измерения термохалинных характеристик и скоростей океанских течений на трех постоянных океанских разрезах (в северной Атлантике и в проливе Дрейка).

### **Программа судовых добровольных наблюдений**

Международная программа судовых добровольных наблюдений (СДН) (*англоязычное название программы СДН – Voluntary Observing Ship (VOS) program (<http://sot.jcommops.org/vos>)*) за параметрами и состоянием поверхности Мирового океана (температура воды, волнение, ледовые условия) и приземной атмосферы (температура, влажность, атмосферное давление, ветер, видимость, облачность, осадки) выполняется уже много десятилетий с тысяч судов (торговых, рыболовных, научно-исследовательских, паромных, круизных и др.). Всего в программе СДН участвуют 24 страны, в том числе и Россия (рис. 4). Наблюдения (визуальные и считывание показаний измерителей) проводятся по пути следования судов в фиксированные сроки (0, 6, 12 и 18 ч. ВСВ). Если судно оснащено автоматической гидрометеорологической станцией, то интервал измерений сокращается до одного или трех часов. Оперативная информация поступает в национальную службу погоды (в России – в Гидрометцентр России) и далее в метеослужбы других стран по ГСТ ВМО.

Основным хранилищем информации обо всех судах добровольных наблюдений в мире является база метаданных, созданная силами французского метеорологического агентства ([http://www.jcommops.org/sot/vos\\_esurfmar/vosmetadata\\_v6](http://www.jcommops.org/sot/vos_esurfmar/vosmetadata_v6)). База хранит разнообразную текущую и архивную информацию о СДН: характеристики судов, приборов, наблюдений, отчеты портовых метеорологов, которые работают с командным составом судов во время их захода в порт. Контролировать регулярность и качество судовых наблюдений, передаваемых в ГСТ, можно через специальные on-line интернет-ресурсы, доступные национальным кураторам и портовым метеорологам.

По состоянию на конец третьего квартала 2017 г. в программе СДН от России участвовали 111 судов (*критерий активности судна в программе СДН – минимум два наблюдения хотя бы в одном месяце в году*). С каждым годом число российских (впрочем, как и зарубежных) судов, передающих наблюдения (многие



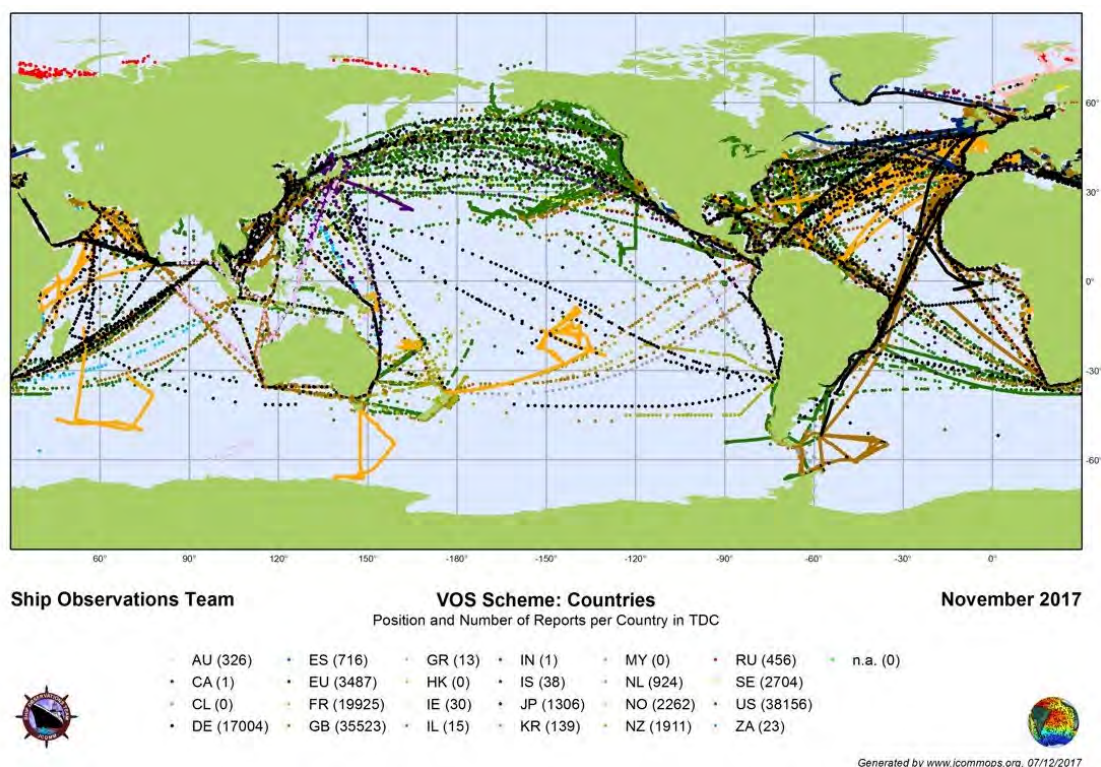


Рис. 4. Положение точек гидрометеорологических наблюдений, выполненных добровольно с судов по пути их следования в ноябре 2017 г., и число сводок, переданных судами каждой из стран, участвующих в СДН (<http://www.jcommops.org/sot>).

из которых принадлежат частным компаниям), сокращается (точнее, число судов, переставших передавать наблюдения, превышает число судов, рекрутируемых в программу СДН). Наибольшее число судов, задействованных в программе СДН от России, относится к Минтрансу России и Росрыболовству. Участвовали также суда Росгидромета, Минприроды России, МЧС России, Росатома и РАН. К сожалению, НИС ИО РАН, в отличие, например, от НИС ДВО РАН в данной программе участия не принимали. Для участия в программе СДН достаточно установить контакт с портовым метеорологом, который предоставит методические материалы, проверит приборы и зафиксирует их характеристики, а также зафиксирует параметры судна (позывной сигнал и др.).

В российской сети СДН нет судов класса VOSclim (<http://sot.jcommops.org/vos/vosclim.html>). Это суда с высоким качеством наблюдений, данные которых используются для климатических обобщений. Для них применяется процедура сертификация уровня качества и количества приборов и количества наблюдений по срокам и составу. Эти наблюдения проверяются автоматическими программами проверки в метеослужбах Франции, Великобритании и США. Только эти наблюдения попадают в специальные базы по климатологии и квалифицируются как данные заданной точности.

Программа СДН – составляющая более общей программы судовых наблюдений под названием Ship Observation Team (SOT). Другая составляющая SOT – это

программа наблюдений за распределением температуры по глубине в верхнем слое океана вдоль судоходных трасс – Ship of Opportunity Programme (SOOP). Наблюдения по программе SOOP проводятся рядом стран с 1980 г. преимущественно с паромов и контейнеровозов с помощью обрывных батитермозондов ХВТ. С российских судов такие наблюдения не выполняются. В прошлом массово ХВТ-зондирования верхнего слоя океана производились с отечественных судов во времена советско-американского эксперимента ПОЛИМОДЕ (Никитин, 1984; Nikitin, Vinogradova, 1986).

### Программа OceanSites

OceanSITES (<http://www.oceansites.org>) – это глобальная международная система стационарных заякоренных буйковых станций (с поверхностной или притопленной плавучестью), на которых производятся долговременные (многолетние) наблюдения за разнообразными параметрами океанской среды по всей ее толще, а также за волнением, уровнем моря и параметрами приземной атмосферы. На большинстве станций измеряются основные физические переменные: температура воды, электропроводность, давление и скорость. На некоторых станциях установлены гидрооптические, гидрохимические и гидробиологические датчики. OceanSites является частью ГСНО и данные наблюдений общедоступны – как оперативные, так и отсроченные посредством центров данных в США и во Франции.

Наблюдения выполняются с высокой частотой в специально выбранных (критических, репрезентативных или реперных) фиксированных точках Мирового океана. Согласно рис. 5, большое значение придается мониторингу состояния экваториально-тропической зоны Мирового океана, где совокупность меридионально-ориентированных кластеров заякоренных буйковых станций установлена поперек системы основных средних течений. Данные наблюдений на этих кластерах позволяют заблаговременно давать прогноз времени возникновения явлений Эль-Ниньо или Ла-Нинья. Зонально ориентированный кластер буйковых станций в проливе Фрама служит для мониторинга водообмена между Атлантическим и Северным Ледовитым океанами. Полученные на станциях долговременные ряды наблюдений служат для выявления сезонной и межгодовой изменчивости параметров водной толщи, оценки трендов и для тестирования моделей.

Россия не принимает участие в программе OceanSites, хотя до 1990-х годов постановки автономных заякоренных буйковых станций на длительный срок для измерения течений и температуры на различных глубинах составляли один из основных методов отечественных океанологических исследований. Они массово применялись в период таких крупных экспериментов в океане как «Полигон-70», «ПОЛИМОДЕ», «Мезополигон», «Мегаполигон», «Абиссаль» (Корт, Самойленко, 1974; Каменкович, Кошляков, Монин, 1987; Корт, 1988; Иванов, 1992; Никитин, 1995).

В последние годы в морях, прилегающих к России, выполнялись постановки буйковых станций на длительный срок, однако как сами носители (заякоренные буйковые станции), так и устанавливаемые на них измерители были исключительно зарубежного производства.



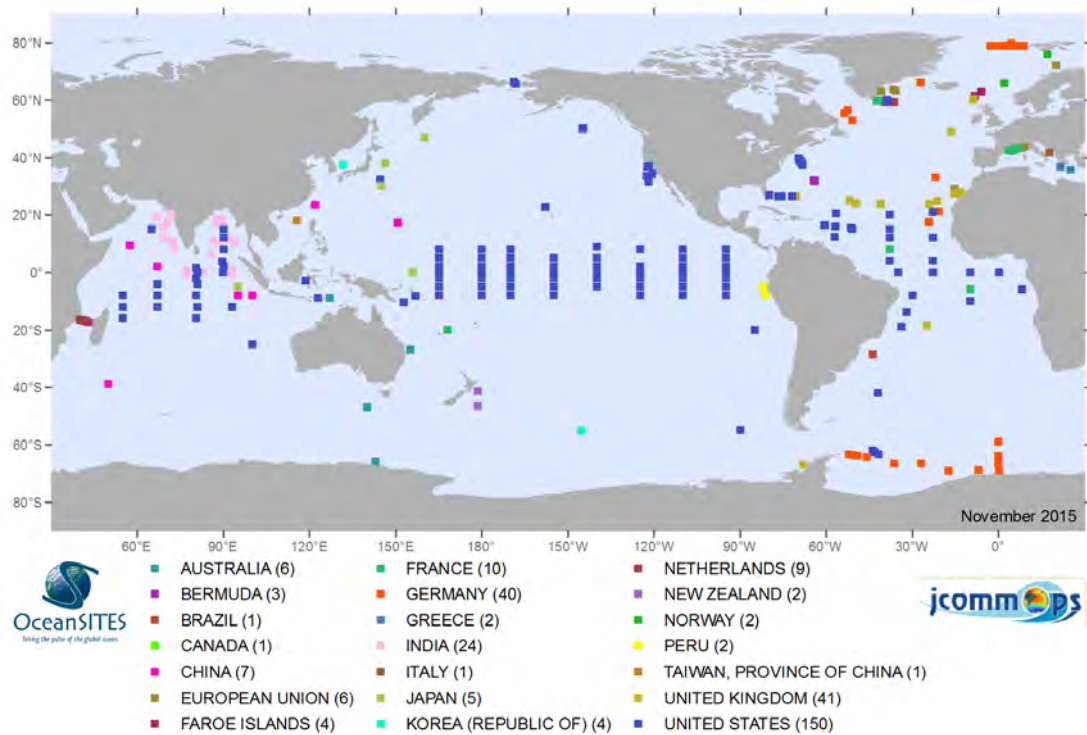


Рис. 5. Положение долговременных заякоренных буйковых станций в Мировом океане в системе OceanSites в 2015–2017 гг. и перечень стран, участвовавших в их постановках (<http://www.oceansites.org/index.html>).

В 2009–2010 гг. Росгидрометом были произведены закупки за рубежом 19-ти комплектов морских автономных заякоренных станций в вариантах поверхностной гидрометеорологической (9 экз.), притопленной и донной гидрологической станций (по 5 экз.) для производства долговременных измерений в основном в прибрежной зоне морей, прилегающих к России, а также в устьевой области Северной Двины, на Онежском и Ладожском озерах. Приобретение этих станций не подкреплялось выделением средств на их установку в море, их дальнейшее техническое обеспечение и ремонт. Для специалистов региональных управлений Росгидромета, куда были распределены станции, не была в должной мере организована учеба с практическими занятиями собственно по установке станций, подсоединению измерителей и проверки их на герметичность. Поэтому в настоящее время часть станций повреждена и восстановлению не подлежит, часть необходимо ремонтировать, часть законсервирована и только малая часть станций периодически устанавливается и эксплуатируется.

В 2010 г. ДВНИГМИ Росгидромета закупил и поставил буй ДАРТ с регистратором придонного давления американского производства в Курильском районе Тихого океана, который проработал в составе системы раннего предупреждения о цунами до июля 2014 г. В 2015 г. ДВНИГМИ поставил 2 буя ДАРТ, которые в настоящее время не работают. Информация о буях ДАРТ и местоположение этих буев отражались на сайтах JCOMM (<http://www.jcommops.org/dbcp/network/maps.html>),

ДВНИГМИ, а данные наблюдений были доступны на сайте Российской службы предупреждения о цунами.

Притопленные заякоренные буйковые станции (ПБС) ставятся на длительный срок в арктическом регионе во время экспедиций ААНИИ Росгидромета. Например, летом 2015 г. в ходе российско-американской экспедиции АВЛАП/NAVOS-2015 на НИС «Академик Трешников» было поднято 8 из 9 ПБС, установленных в 2013 г. (одна станция не была обнаружена), и вновь выставлено 13 ПБС. На ПБС были установлены измерители течений ADCP и RCM, термохалинные профилографы MMR, гидрологические зонды SBE37 (в том числе с датчиком кислорода), измерители нитратов, измерители параметров дрейфа льда ULS, измерители придонного давления SBE 26. Однако полная метаинформация о всех таких постановках в разные годы на сайте ААНИИ отсутствует.

В системе OceanSites нередко заякоренные буйковые станции ставят парами. При этом на одной станции происходят традиционные измерения параметров водной толщи на фиксированных горизонтах. А на соседней станции работает автоматический зонд-профилограф, перемещающийся вверх-вниз вдоль вертикально натянутого несущего троса в пределах выбранного диапазона глубин и записывающий информацию о вертикальном распределении заданных параметров среды. В итоге получают временные ряды тонкоструктурных профилей гидрофизических или биогеохимических параметров среды в зависимости от измерителей, устанавливаемых на зонд. Подобный автоматический зонд-профилограф Аквалог был создан в Институте океанологии РАН (Островский и др., 2013). Он предназначен для автономной работы до одного года и в последние годы успешно использовался для измерений в ряде морей.

### Программа GLOSS

Международная программа «Глобальная система наблюдений за уровнем Мирового океана» (GLOSS: Global Level Of the Sea Surface) была принята МОК ЮНЕСКО в 1985 г. для координации наблюдений за уровнем Мирового океана с помощью национальных сетей уровнемеров, повышения стандарта наблюдений и сбора качественных данных для научных исследований. Наблюдения за уровнем морей и океанов дают информацию о широком спектре изменения уровня, начиная от приливов до межгодовых вариаций и глобального повышения уровня Мирового океана, включая экстремальные явления, связанные с цунами, штормовыми нагонами и другими факторами, приводящими к краткосрочным затоплениям прибрежных районов.

В рамках программы GLOSS была определена базовая сеть уровнемеров для долгосрочного (постоянного) слежения за уровнем Мирового океана, представленная на веб-сайте программы GLOSS (<http://www.gloss-sealevel.org>) и на рис. 6. Веб-сайт давно не обновлялся, но запланировано его обновление. Распределение 289 пунктов наблюдений за уровнем Мирового океана на рис. 6 соответствует ситуации 2010 г. Данные наблюдений с этих и многих других пунктов доступны на сайте Постоянной службы среднего уровня моря (<http://www.psmsl.org/data>).



Рис. 6. Базовая сеть уровнемеров ГЛОСС (<http://www.gloss-sealevel.org>).

В 1990 г. был принят первый план реализации программы GLOSS, в котором были определены технические стандарты для уровнемерных станций, обязательства государств-членов, участвующих в GLOSS, и перечень примерно из 300 уровнемеров, развернутых по всему миру и входящих в базовую сеть GLOSS. Госкомгидромет СССР взял на себя обязательства о ежегодной передаче в международные центры сбора (в Англию и США) среднемесячных уровенных данных с 13 станций. Однако фактически данные стали поступать только с 6 станций, а с 1993 г. по причине поломки оборудования в Южно-Курильске – с 5 станций, располагающихся в Баренцбурге, Мурманске, Нагаево, Туапсе и Петропавловске-Камчатском.

В 1997 г. был принят обновленный план реализации GLOSS, в который Росгидромет заявил 18 станций, расширив предыдущий список на 5 станций: ГМС Диксон, Тикси, Находка, Провидения и Кронштадт. В 2005 и 2007 гг. были представлены перспективные планы расширения сети российских станций GLOSS до 21 станции, в которых ряд станций из представленных ранее, но переставших работать, был заменен на новые. Однако все предлагавшиеся в разное время Росгидрометом планы не были реализованы. В результате уже третий десяток лет ЦОД ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета ежегодно передает за рубеж среднемесячные уровенные данные все с тех же перечисленных выше 5 станций, заявленных еще во времена СССР, хотя согласно официальному перечню станций GLOSS, закрепленных в настоящее время за РФ ([http://www.gloss-sealevel.org/network\\_status/glosscorenetwork10.html#.WjvH5rpuJOQ](http://www.gloss-sealevel.org/network_status/glosscorenetwork10.html#.WjvH5rpuJOQ)), данные должны поставляться с 12 станций.

В 2012 г. был официально принят новый, третий по счету план реализации GLOSS. В этом плане был сформулирован и закреплён новый технический стандарт для станций GLOSS. В соответствии с этим документом было рекомендовано впредь передавать со всех станций GLOSS в центры сбора данных (в Великобританию и США) не только среднемесячные, но и оперативные или квазиоперативные данные по уровню моря. Второе нововведение – все станции GLOSS должны быть

оснащены стационарными GPS (или ГЛОНАСС, GALILEO, Бэйдоу) приемниками в целях выявления и исключения влияния вертикальных подвижек земной поверхности в пунктах измерений, причем данные измерений приемниками должны передаваться в зарубежные центры сбора данных.

В силу низкого финансирования Росгидромета со стороны государства средства на модернизацию российской морской сети наблюдений, включая российский сегмент GLOSS, не выделяются, сеть деградирует. Хотя при наличии средств ситуация была бы быстро исправлена. После наводнения 2012 г. в Крымске Краснодарского края, вызванного проливными дождями, во время которого погибло более 170 человек и тысячи пострадали, были выделены бюджетные средства. В результате на территории Краснодарского края в 2012-2013 гг. была создана автоматизированная система мониторинга паводковой ситуации с визуализацией в Интернете, насчитывающая 190 автономных автоматических уровнемерных станций (<http://emergit.ru/map>), оснащенных также стационарными ГЛОНАСС/GPS приемниками. Для сравнения вся российская государственная морская уровнемерная сеть, расположенная на побережье 13 морей, окружающих Россию, и на российском побережье Тихого океана, состоит из 110 станций. При этом для измерения уровня моря на государственных морских станциях используются главным образом не автоматические уровнемеры, а уровнемерные рейки и сваи для визуальных наблюдений за уровнем воды.

В статье (Никитин, Ааруп, 2016) дается изложение участия России в программе GLOSS, подробное описание российского сегмента GLOSS и информация о центрах архивирования данных. Подчеркивается важность поддержания и развития национальной сети наблюдений за уровнем морей (включая наблюдения за вертикальными перемещениями берегов), без которой невозможен мониторинг и прогноз изменений уровня морей, окружающих Россию.

### Заключение

Из-за экономических проблем в последние десятилетия Россия оказалась не в состоянии на должном уровне участвовать в программах ГСНО. Государственная федеральная целевая программа «Мировой океан» на 2016-2031 годы и, в частности, ее подпрограмма «Единая система информации об обстановке в Мировом океане» (ЕСИМО) в настоящее время не финансируется. Для остановки деградации и устойчивого выхода России на современный уровень океанографических исследований требуются серьезные финансовые вливания в океанографическую науку, в модернизацию существующих и создание новых технических средств выполнения океанографических наблюдений. В некоторых организациях России созданы образцы передовой океанской техники, которые позиционируются как «уникальные». Беда в том, что они работают в единичных экземплярах и до их сертификации и серийного, не кустарного производства существует огромная дистанция.

Целесообразно наладить гидрофизический мониторинг морей, прилегающих к России, с помощью автономных автоматических наблюдательных платформ – как



свободно плавающих (поверхностные дрейфтеры и буи типа ARGO), так и заякоренных (буи с регистраторами течений, температуры и других параметров на различных глубинах, а также волновые буи и буи с видеокамерами на морской поверхности), с которых данные наблюдений в режиме реального времени поступали бы в центры сбора и обработки данных. Вдоль российских побережий морей следует разместить (как это уже сделано в США, Норвегии, Испании и др. странах) высокочастотные радары для определения поля скорости поверхностных течений вблизи берегов в полосе до 200 км и параметров морских волн.

При текущей недостаточности финансирования представляется важной концентрация усилий на создании и поддержке национальных информационно-справочных систем о состоянии Мирового океана на основе доступных данных, получаемых с помощью ГСНО и интеграции этих систем в ЕСИМО, а также на обработке и анализе этих данных, развитии численных гидротермодинамических моделей с усвоением данных ГСНО (например, Лебедев, 2016; Лебедев, Саркисян, Никитин, 2016; Никитин, Касьянов, 2018; Никитин, Касьянов, Музыка, 2005; Саркисян, Никитин, Лебедев, 2016; Nikitin, 2012), что требует относительно малого финансирования со стороны государства.

Математическая обработка разнообразных данных ГСНО, их анализ, интерпретация и публикация научных результатов за счет государственных средств также является вкладом России в международное сотрудничество, вкладом не менее важным, чем выполнение самих наблюдений в рамках ГСНО.

### Литература

- Бубынин М.Д., Горлов В.А., Толкачев А.Я. Анализ существующих международных систем наблюдений в Мировом океане и перспектив их развития на основе применения современных технических средств наблюдений // *Инноватика и экспертиза*. 2013. Вып. 2(11). С. 116–127.
- Иванов Ю.А. (отв. ред.). Эксперимент Мегаполигон: гидрофизические исследования в северо-западной части Тихого океана // *Сб. статей*. М.: Наука, 1992. 414 с.
- Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 512 с.
- Корт В.Г. (отв. ред.). Гидрофизические исследования по программе Мезополигон // *Сб. статей*. М.: Наука, 1988. 263 с.
- Корт В.Г., Самойленко В.С. (отв. ред.). Атлантический гидрофизический полигон-70. Метеорологические и гидрофизические исследования // *Сб. статей*. М.: Наука, 1974. 317 с.
- Лебедев К.В. Арго-модель исследования глобального океана (АМИГО) // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 2. С. 186–196.
- Лебедев К.В., Саркисян А.С., Никитин О.П. Сравнительный анализ поверхностной циркуляции Северной Атлантики, воспроизведенной тремя различными методами // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 4. С. 465–474.
- Никитин О.П. Данные ХВТ ПОЛИМОДЕ // *Известия ПОЛИМОДЕ*. М.: ИО АН СССР, 1984. Вып. 9. С. 3-11.
- Никитин О.П. Исследования ГОИН по проекту «Абиссаль» // *Исследование океанов и*



- морей. Вып.2 / Под ред. Ф.С. Терзиева. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1995. С. 90-95.
- Никитин О.П., Касьянов С.Ю., Музыка Г.В.* Компьютерная информационно-справочная система «Поверхностные течения Мирового океана» // Труды ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 75-89.
- Никитин О.П., Касьянов С.Ю.* О дрейфтерных наблюдениях за течениями и температурой в Баренцевом и Карском морях // Труды ГОИН. 2016. Вып. 217. С. 171–183.
- Никитин О.П., Касьянов С.Ю.* О новых картах поверхностных течений Мирового океана // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478. № 3. С. 352–355.
- Никитин О.П., Ааруп Т.* Участие России в международной программе глобальных наблюдений за уровнем Мирового океана (GLOSS) // Записки по гидрографии. 2016. Вып. 299. С. 61–74. URL: <http://hydro-so.spb.ru/?menu=1228>.
- Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А.* Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 259–268.
- Островский А.Г., Леденев В.В., Швоев Д.А.* Автономный дрейфующий, профилирующий океанологический буй // Пат. РФ № 2609849. Заявл. 27.11.2015. Опубл. 06.02.2017. Бюл. № 4.
- Саркисян А.С., Никитин О.П., Лебедев К.В.* Физические характеристики Гольфстрима, как индикатор качества моделирования циркуляции Мирового океана // Доклады Академии наук. 2016. Т. 471. № 5. С.595-598.
- Lumpkin R., Pazos M.* Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data and some recent results // Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics / Ed. Griffa A. et al. Cambridge Univ. Press. Cambridge, 2007. Chap. 2. P. 39–67.
- Nikitin O.P., Vinogradova K.G.* Maps of hydrophysical characteristics: Temperature from XBT-observations // The POLYMODE Atlas. Woods Hole Oceanographic Institution. Massachusetts. USA, 1986. P. 223–251.
- Nikitin O.P.* Storage, processing and visualization data system of drifter observations of surface currents in the World Ocean // Russ. J. Earth. Sci. 2012. Vol. 12. No. 5. ES5002. doi:10.2205/2012ES000521. 7 p.
- Tambovsky V., Bobkov A.* Research of dynamics of ice and surface waters of the sea of Okhotsk by floating drift buoys equipped with Argos terminal // Pacific Oceanography Journal. 2013. Vol. 6. No. 1. P. 72–81.

## INTERNATIONAL PROGRAMS OF GLOBAL OCEANOGRAPHIC OBSERVATIONS AND RUSSIA'S PARTICIPATION IN THEM

**O.P. Nikitin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*N.N. Zubov's State Oceanographic Institute of Roshydromet  
Kropotkinsky per. 6, 119034, Moscow, e-mail: [opnikitin@mail.ru](mailto:opnikitin@mail.ru)*  
<sup>2</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia  
Submitted 15.10.2017, accepted 25.12.2017*

The international programs have been considered within which global oceanographic in-situ measurements are systematically carried out: the Global Drifter Program of tracking of currents in the upper ocean mixed layer as well as measurements of water temperature and atmospheric pressure at the ocean surface along the trajectories of buoys (drifters) which

are freely drift with surface ocean currents; the ARGO program of global measurements of vertical profiles of temperature and salinity as well as currents at the given depth of drift by means of network of the diving buoys; the GO-SHIP program of repeated hydrographic measurements along the system of oceanographic sections which is carried out by means of drop probes from the research vessels; the VOS program of ship-based voluntary observations for hydrometeorological parameters and the state of the ocean surface and the overlying atmosphere; the OceanSITES program of long-term observations of various oceanographic parameters at the surface of the ocean and its depths on a global network of moorings and the GLOSS program of monitoring of the global ocean level on the network of coastal stations. The participation of Russian organizations of an oceanographic profile in the listed programs of observations has been described – the observations which form the surface-oceanic subsystem of the Global Ocean Observing System.

**Keywords:** the Global Ocean Observing System, the Global drifter program, the ARGO program, the GO-SHIP program, the VOS program, the OceanSITES program, the GLOSS program, national coordinators

### References

- Bubynin M.D., Gorlov V.A., Tolkachev A.Ya.*, Analiz sushchestvuyushchikh mezhdunarodnykh sistem nablyudenii v Mirovom okeane i perspektiv ikh razvitiya na osnove primeneniya sovremennykh tekhnicheskikh sredstv nablyudenii (Analysis of the existing international observation systems of the World ocean and perspectives of their development on the basis of application of modern technological means of observation), *Innovatika i ekspertiza*, 2013, No. 2(11), pp. 116–127.
- Ivanov Yu.A.* (ed.), Eksperiment Megapoligon: gidrofizicheskie issledovaniya v severozapadnoi chasti Tikhogo okeana (Megapoligon experiment: hydrophysical investigations in the north-west part of the Pacific ocean), Moscow: Nauka, 1992, 414 p.
- Kamenkovich V.M., Koshlyakov M.N., Monin A.S.*, Sinopticheskie vikhri v okeane (Synoptic eddies in the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 512 p.
- Kort V.G.* (ed.), Gidrofizicheskie issledovaniya po programme Mezopoligon (Hydrophysical investigations under Mezopoligon program), Moscow: Nauka, 1988, 263 p.
- Kort V.G., Samoilenko V.S.* (ed's), Atlanticheskii gidrofizicheskii poligon-70 (Atlantic hydrophysical poligon-70), Moscow: Nauka, 1974, 317 p.
- Lebedev K.V.*, An argo-based model for investigation of the Global Ocean (AMIGO), *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 172–181.
- Lebedev K.V., Sarkisyan A.S., Nikitin O.P.*, Comparative analysis of the North Atlantic surface circulation reproduced by three different methods, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 410–417.
- Lumpkin R., Pazos M.*, Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data and some recent results, Lagrangian analysis and prediction of coastal and ocean dynamics / Ed. Griffa A. et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007, Chap. 2, pp. 39–67.
- Nikitin O.P.*, Storage, processing and visualization data system of drifter observations of surface currents in the World Ocean, *Russ. J. Earth. Sci.*, 2012, Vol. 12, No. 5, ES5002, doi:10.2205/2012ES000521, 7 p.
- Nikitin O.P., Aarup T.*, Uchastie Rossii v mezhdunarodnoi programme global'nykh nablyudenii za urovнем Mirovogo okeana (GLOSS) (Participation of Russia in the international program

- of global ocean level observations (GLOSS)), *Zapiski po gidrografii*, 2016, No. 299, pp. 61–74. Available at: <http://hydro-so.spb.ru/?menu=1228>.
- Nikitin O.P.*, Dannye KhVT POLIMODE (POLYMODE XBT data), *Izvestiya POLIMODE*, Moscow: IO AN SSSR, 1984, No. 9, pp. 3–11.
- Nikitin O.P.*, Issledovaniya GOIN po proektu “Abissal” (Investigation of SOI under “Abyssal” project), In: *Issledovanie okeanov i morei* (Investigations of oceans and seas), No. 2 / Terziev F.S. (Ed), Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1995, pp. 90–95.
- Nikitin O.P.*, *Kas’yanov S.Yu.*, *Muzyka G.V.*, Komp’yuternaya informatsionno-spravochnaya sistema “Poverkhnostnye techeniya Mirovogo okeana” (Computer informational system “Surface currents of the World ocean”), *Trudy GOIN*, 2005, No. 209, pp. 75–89.
- Nikitin O.P.*, *Kas’yanov S.Yu.*, O drifternykh nablyudeniyakh za techeniyami i temperaturoi v Barentsevom i Karskom moryakh (About drifter observations of currents and temperature in the Barents and Kara Seas), *Trudy GOIN*, 2016, No.217, pp. 171–183.
- Nikitin O.P.*, *Kas’yanov S.Yu.*, O novykh kartakh poverkhnostnykh techenii Mirovogo okeana (About new maps of surface currents of the World Ocean), *Doklady Akademii nauk*, 2018, Vol. 478, No. 3, pp. 352–355.
- Nikitin O.P.*, *Vinogradova K.G.*, Maps of hydrophysical characteristics: Temperature from XBT-observations, The POLYMODE Atlas, Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, USA, 1986, pp. 223–251.
- Ostrovskii A.G.*, *Ledenev V.V.*, *Shvoev D.A.*, Avtonomnyi dreifuyushchii, profiliruyushchii okeanologicheskii bui (Autonomous drifting profiling oceanographic buoy), Pat. RF No. 2609849, Zayavl. 27.11.2015, Opubl. 06.02.2017, Bul. No. 4.
- Ostrovskii A.G.*, *Zatsepin A.G.*, *Soloviev V.A.*, *Tsibulsky A.L.*, *Shvoev D.A.*, Autonomous system for vertical profiling of the marine environment at a moored station, *Oceanology*, 2013, Vol. 53, No. 2, pp. 233–242.
- Sarkisyan A.S.*, *Nikitin O.P.*, *Lebedev K.V.*, Physical characteristics of the Gulf Stream as an indicator of the quality of large-scale circulation modeling, *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 471, No. 2, pp. 1288–1291.
- Tambovsky V.*, *Bobkov A.*, Research of dynamics of ice and surface waters of the sea of Okhotsk by floating drift buoys equipped with Argos terminal, *Pacific Oceanography Journal*, 2013, Vol. 6, No. 1, pp. 72–81.

## НАХОДКА БОЛЬШОЙ КЛОНАЛЬНОЙ ГРУППЫ ОБЛИГАТНО СИМБИОТИЧЕСКОЙ АКТИНИИ *ENTACMAEA QUADRICOLOR* БЕЗ РЫБ-СИМБИОНТОВ – ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СРЕДЫ

Д.А. Астахов<sup>1</sup>, О.В. Савинкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36 e-mail: [dmastakhov@rambler.ru](mailto:dmastakhov@rambler.ru)

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН, 119071, Москва, Ленинский проспект, д. 33 e-mail: [o.savinkin@mail.ru](mailto:o.savinkin@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 10.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Большая клональная группа облигатно симбиотической актинии *Entacmaea quadricolor* (Leuckart in Rüppell et Leuckart, 1828) (Anthozoa, Actiniaria, Actiniidae) была обнаружена на станции с координатами 20°44'09.0" с.ш. и 107°08'55.8" в.д. в водах о-вов Кат Ба в Тонкинском заливе. Эта клональная группа располагалась на глубине 4 м на каменистом грунте, окружённом песками, имела площадь около 15 м<sup>2</sup> и состояла из сотен актиний, но не была заселена анемоновыми рыбами. Большие клональные группы симбиотической актинии *E. quadricolor*; не заселённые анемоновыми рыбами, прежде не отмечались в других районах прибрежных вод Вьетнама. Сравнение изученной акватории с водами Гонконга показало их схожесть по температурным и гидрологическим параметрам, при большей мутности в районе Кат Ба. В водах Гонконга огромные поля симбиотической актинии *E. quadricolor* отличаются исключительно низкой плотностью анемоновых рыб: 0.07–0.26 рыб на м<sup>2</sup>. Из этого следует, что условия окружающей среды в водах Гонконга, и особенно о-вов Кат Ба, являются экстремальными для обитания анемоновых рыб, даже для *Amphiprion clarkii*. Вероятно, единичные экземпляры анемоновых рыб могут быть найдены в районе о-вов Кат Ба при проведении расширенных работ по изучению крупных клональных групп симбиотической актинии *E. quadricolor*.

**Ключевые слова:** симбиотические актинии, Actiniaria, Actiniidae, *Entacmaea quadricolor*; анемоновые рыбы, Pomacentridae (Amphiprioninae), Тонкинский залив, Вьетнам.

Облигатно симбиотическая актиния *Entacmaea quadricolor* (Leuckart in Rüppell et Leuckart, 1828) (Anthozoa, Actiniaria, Actiniidae) обладает обширным ареалом, простирающимся в тропических и субтропических водах Индо-Пацифики от Красного моря и восточной Африки через Индийский океан, Индо-Австралийский архипелаг, Микронезию, Меланезию и Полинезию до о-вов Туамоту; на север вид доходит до центральной Японии; на юг – до залива Моретон, северной части побережья штата Новый Южный Уэльс Австралии и о-ва Лорд-Хау (Dunn, 1981; Allen, 1991; Fautin, Allen, 1997; Fautin et al., 2008). *Entacmaea quadricolor* встречается в диапазоне глубин: от менее чем метра до 58 м на коралловых рифах, каменистых грунтах и на участках мягких грунтов, где присутствуют выходы твёрдых субстратов (Dunn, 1981; Bridge et al., 2012). Этот вид актинии существует в двух формах: одиночной и клональной, возникшей в результате бесполого деления первоначально одной или нескольких актиний (Dunn, 1981). Клональные группы *E. quadricolor*

могут формировать целые поля, занимать площадь более 3000 м<sup>2</sup> и насчитывать сотни тысяч отдельных особей (Lee et al., 2015). Этот вид актинии является симбиотическим для 2 родов и 15 видов анемоновых рыб (Amphiprioninae): *Amphiprion akindynos*, *A. allardi*, *A. barberi*, *A. bicinctus*, *A. chrysopterus*, *A. clarkii*, *A. ephippium*, *A. frenatus*, *A. latezonatus*, *A. mccullochi*, *A. melanopus*, *A. omanensis*, *A. rubrocinctus*, *A. tricinctus* и *Premnas biaculeatus* (Allen, 1991; Fautin, Allen, 1997; Allen et al., 2008).

В прибрежных водах Вьетнама к настоящему времени симбиотическая актиния *E. quadricolor* указана на следующих акваториях (рис. 1): о-ва Ко То (Астахов, личные наблюдения), о-в Бак Лонг Ви (Astakhov, 2012, рис. 2–3), о-в Кон Ко (Астахов, личные наблюдения, рис. 4), провинция Кхань Хоа (Ханьхоа) – заливы Нячанг, Ванфонг и окружающие районы (Астахов, 1997; Astakhov, 2002), о-ва Фу Куи (Astakhov et al., 2016) и о-ва Кон Сон (Кон Дао) (Astakhov et al., 2008). Показано, что этот вид актинии во вьетнамских прибрежных водах отмечен в симбиозе лишь с

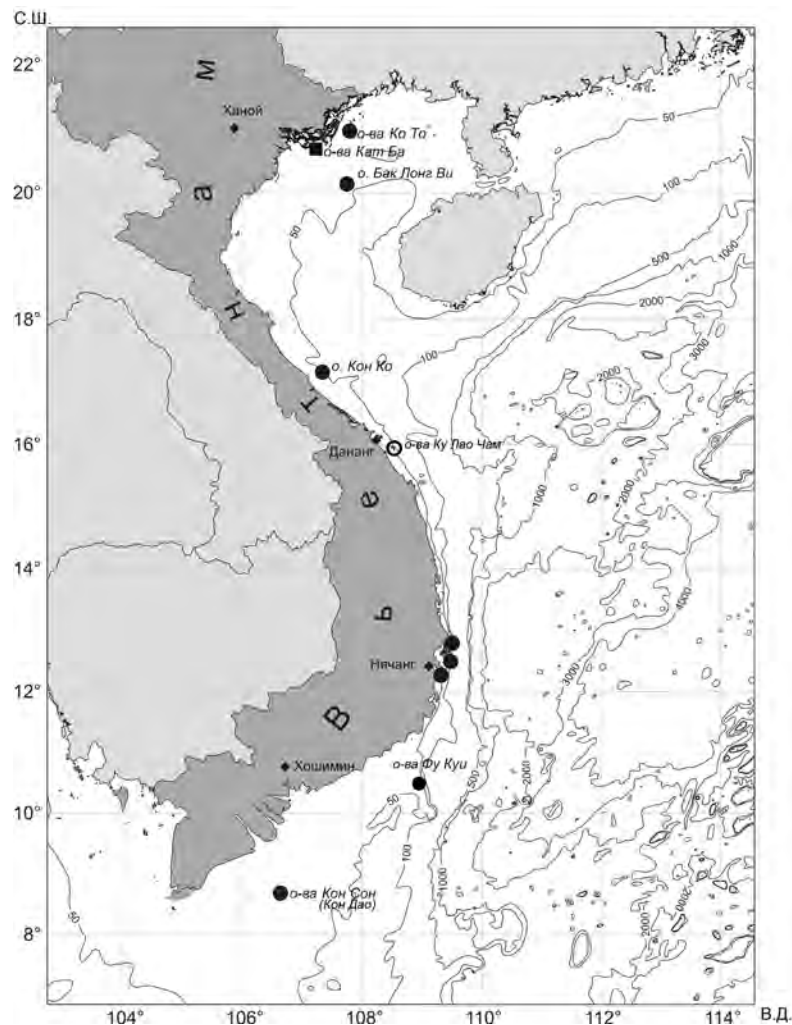


Рис. 1. Карта распространения симбиотической актинии *Entactmaea quadricolor* в прибрежных водах Вьетнама: ■ – район работ в водах о-вов Кат Ба; ● – литературные данные; ○ – о-ва Ку Лао Чам, где отмечено нахождение *Amphiprion frenatus*, а значит и актинии *Entactmaea quadricolor*, только с которой этот вид и встречается в симбиозе.





Рис. 2. *Amphiprion clarkii* в клональной группе актинии *Entactmaea quadricolor*. У некоторых актиний видны бульбовидные расширения в средней части щупалец. О-в Бак Лонг Ви, глубина 8 м (фото Д.А. Астахова).



Рис. 3. Край клональной группы актинии *Entactmaea quadricolor*. Бульбовидные расширения на щупальцах каждой актинии занимают терминальное положение. О-в Бак Лонг Ви, глубина 8 м (фото Д.А. Астахова).

2 видами анемоновых рыб: *Amphiprion clarkii* и *A. frenatus*. При этом *A. clarkii*, кроме *E. quadricolor*, может заселять ещё 8 видов симбиотических актиний, а *A. frenatus* обитает всегда только в симбиозе с *E. quadricolor* и вне этого вида актинии во вьетнамских водах не встречается. Вьетнамские исследователи указывают *A. frenatus* с рифов о-вов Ку Лао Чам (Nguyen Nhat Thi, Nguyen Van Quan. 2005), что неизбежно свидетельствует также о присутствии симбиотической актинии



Рис. 4. Ассоциация 2-х *Amphiprion clarkii* с небольшой клональной группой актинии *Entacmaea quadricolor*. О-в Кон Ко, глубина 1 м (фото Д.А. Астахова).

*E. quadricolor* и в этом районе (рис. 1). Таким образом, актиния *E. quadricolor* в симбиозе с анемоновыми рыбами (*A. clarkii* или *A. frenatus*) встречается в прибрежных водах Вьетнама от примерно от 21°30' до 8°36' с.ш. Далее на юго-запад в Сиамский залив *E. quadricolor* не заходит, так как не отмечается уже в северо-восточной части залива на рифах о-вов Ан Тхой (Astakhov et al., 2016). В центральной, северной и западной частях Сиамского залива рассматриваемый вид симбиотической актинии также, вероятнее всего, не встречается, так как в этих районах из анемоновых рыб указываются только *A. perideraion* и *A. polymnus* (Satapoomin, 2000), которые заселяют другие виды симбиотических актиний (Allen, 1991; Fautin, Allen, 1997; Allen, Erdmann, 2012; Astakhov et al., 2016). Южнее Сиамского залива *E. quadricolor* появляется на рифах восточного побережья п-ова Малакка в районе о-ва Бидонг, где указывается в симбиозе с анемоновой рыбой *A. frenatus* (Yusuf, Shibukawa, 2011).

Наиболее суровые в водах Вьетнама условия для обитания *E. quadricolor* и симбиотических анемоновых рыб отмечаются в Тонкинском заливе. Тонкинский залив располагается примерно между 22° и 17° с.ш. и ограничен на западе побережьем Северного Вьетнама, а на востоке о-вом Хайнань. Хайнаньский пролив, соединяющий на севере залив с Южно-Китайским морем, не играет значительной роли в формировании гидрологического режима залива. Основную роль в поддержании температурного режима играет мелководность залива, глубины которого в центральной части значительно меньше 100 м, а большая часть залива имеет глубины даже менее 50 м (рис. 1). Тёплые воды из открытой части Южно-Китайского моря (с юга) постоянно поступают в залив, проходя через его центральную часть на север залива. Обширный материковый сток в северо-западной части залива формирует постоянное сточное течение, идущее на юг вдоль западного побережья залива, т.е. в противоположном направлении течению из Южно-Китайского моря. В



результате взаимодействия этих двух противоположных по направлению течений в северной части залива зимой возникает устойчивая циклоническая, а летом – антициклоническая циркуляции, перемешивающие водные массы от поверхности до дна и формирующие гомотермию и гомохалинность воды по всей толще. В зимний сезон температура воды на большей части акватории залива не опускается ниже 18°C, однако в самой северной части залива, она может снижаться до 17° и кратковременно – до 16°C. Летом температура воды в заливе прогревается до 28–29°, а в прибрежье – до 31°C. Солёность большей части акватории залива превышает 32‰ (Долгих, Шурунов, 1962; Гурьянова, 1972). Тем не менее, эти условия позволяют существовать коралловым поселениям даже в западной части залива (о-в Кат Ба и архипелаг Бай Ты Лонг), испытывающей в наибольшей степени влияние речного стока. Из-за чрезвычайно высокой мутности воды коралловые поселения в этом районе мелководные и представлены преимущественно массивными и инкрустирующими формами кораллов (Латыпов, 1992, 2007; Latypov, 1995). Значительные колебания параметров среды обуславливают интерес к изучению симбиотических сообществ: актинии – анемоновые рыбы вдоль северо-западного побережья Тонкинского залива.

Материалом для настоящей работы послужила подводная съёмка актиний и учет рыб-симбионтов, проведённые вторым автором в водах о-вов Кат Ба (северо-западное побережье Тонкинского залива). Работы проводились по программе изучения биоразнообразия прибрежных вод Вьетнама в ходе экспедиции Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра на акваториях о-вов Кат Ба 17–24 мая 2017 г.

В процессе проведения работ на глубинах до 12 м обнаруживались единичные симбиотические актинии *E. quadricolor* без анемоновых рыб. Однако наибольший интерес представила большая клональная группа актиний *E. quadricolor*, обнаруженная 23.05.2017 г. в районе о-ва Хон Да Ла (20°44'09.0" с.ш. и 107°08'55.8" в.д.). Клональная группа актиний *E. quadricolor* располагалась на плоском каменистом субстрате, окружённом песками, на глубине 4 м, состояла из сотен актиний и занимала площадь около 15 м<sup>2</sup>. Актинии располагались настолько плотно, что почти не было видно грунта. Размер актиний сильно различался (рис. 5), что характерно для клональных групп *E. quadricolor*; у наиболее крупных экземпляров диаметр орального диска составлял 20–25 см. Наличие бульбовидных вздутий на щупальцах некоторых актиний позволило уверенно диагностировать этот вид как *E. quadricolor* (Dunn, 1981; Fautin et al., 2008). Несмотря на высокую мутность воды (видимость не более 1 м), вторым автором была тщательно обследована вся площадь клональной группы актиний в целях обнаружения симбиотических анемоновых рыб. Ни взрослые анемоновые рыбы, ни мальки в актиниях обнаружены не были. Данное событие представляется совершенно уникальным, так как ранее в водах Вьетнама не было обнаружено не заселённых анемоновыми рыбами клональных групп актиний *E. quadricolor* (Astakhov, 2002, 2012). Учитывая высокую турбулентность и мутность вод в районе о-вов Кат Ба, данная клональная группа актиний могла быть заселена



Рис. 5. Край большой клональной группы актинии *Entactmaea quadricolor*. В клональной группе присутствует колония склерактиниевого коралла. О-ва Кат Ба, глубина 4 м (фото О.В. Савинкина).

анемоновыми рыбами только одного вида – *A. clarkii*, наиболее эврибионтного и отмеченного для клональных групп актинии *E. quadricolor* из турбулентных, но более прозрачных, вод о-ва Бак Лонг Ви (Astakhov, 2012) (рис. 2–3). Расстояние по прямой между о-вом Бак Лонг Ви и о-вами Кат Ба составляет порядка 50 миль и перенос личинок *A. clarkii* с о-ва Бак Лонг Ви на актиниевое поле на акватории о-вов Кат Ба представляется вполне реальным. Вероятно, отсутствие *A. clarkii* в изученной клональной группе *E. quadricolor* объясняется необычайной мутностью (видимость не более 1 м), более низкими зимними и более высокими летними температурами на акваториях о-вов Кат Ба в сравнении с о-вом Бак Лонг Ви. Для сравнения следует отметить, что для акватории Гонконга, которая характеризуется схожими с о-вами Кат Ба сезонными колебаниями температуры воды (от 15°C зимой до 30°C летом), высокой турбулентностью, но меньшей мутностью вод – отмечены гигантские клональные поля (площадью до 3200 м<sup>2</sup>) актинии *E. quadricolor*, однако их заселённость чрезвычайно низка и составляет всего 0.07–0.26 экземпляров *A. clarkii* на м<sup>2</sup> (Lee et al., 2015). Для сравнения – плотность заселения клональных групп *E. quadricolor* анемоновыми рыбами (*A. clarkii*) в водах о-ва Бак Лонг Ви, более тёплых зимой и более прозрачных, на порядок выше, чем максимальная плотность заселения в водах Гонконга. Вероятно, при поведении в будущем работ на акваториях о-вов Кат Ба и изучении большего количества крупных клональных групп симбиотической актинии *E. quadricolor*, на некоторых из них будут обнаружены единичные *A. clarkii*, однако следует учитывать, что этот вид рыбы-симбионта может существовать в исследованном районе на грани своих биологических возможностей.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке темы госзадания № 0149-2018-0008.

## Литература

- Астахов Д.А.* Фауна и биология анемоновых рыб (Pomacentridae, Amphiprioninae) и симбиотических актиний (Coelenterata, Actiniaria) провинции Ханьхоа (Южный Вьетнам) // Тез. докл. Первого конгресса ихтиологов России. М.: ВНИРО, 1997. С. 9.
- Гурьянова Е.Ф.* Фауна Тонкинского залива и условия её обитания // Исследования фауны морей. Фауна Тонкинского залива и условия её существования. Т. X (XVIII) / Под ред. Быховского Б.Е. Л.: Наука, 1972. С. 22–146.
- Долгих И.П., Шурунов А.И.* Океанографические работы советско-вьетнамской экспедиции ТИНРО // Океанология. 1962. Т. 2. № 2. С. 368–371.
- Латыпов Ю.Я.* Рифы и сообщества склерактиний западной части архипелага Байтылонг (Южно-Китайское море) // Биология моря. 1992. № 1/2. С. 17–26.
- Латыпов Ю.Я.* Коралловые рифы Вьетнама. М.: Наука, 2007. 158 с.
- Allen G.R.* Damselfishes of the world. Mergus Verlag.: Melle. Germany, 1991. 171 p.
- Allen G.R., Erdmann M.V.* Reef fishes of the East Indies. V. I–III. Perth. Australia: Tropical Reef Res. 2012. 1292 p.
- Allen G.R., Drew J., Kaufman L.* Amphiprion barberi, a new species of anemonefish (Pomacentridae) from Fiji, Tonga, and Samoa // Aqua. Int. J. Ichthyol. 2008. Vol. 14. No. 3. P. 105–114.
- Astakhov D.A.* Species composition of anemonefishes (Perciformes, Pomacentridae) and their host sea anemones (Cnidaria, Actiniaria) in the Khanhhoa Province (South Vietnam) // J. Ichthyol. 2002. Vol. 42. No. 1. P. 37–50.
- Astakhov D.A.* Fauna of anemonefishes (Perciformes, Pomacentridae, Amphiprioninae) and host sea anemones (Cnidaria, Actiniaria) of the Bach Long Vi Island (South China Sea, Gulf of Tonkin, Northern Vietnam) // J. Ichthyol. 2012. Vol. 52, No. 9. P. 661–663.
- Astakhov D.A., Savinkin O.V., Ponomarev S.A.* Fauna of anemonefishes (Pomacentridae, Amphiprioninae) and their host sea anemones (Cnidaria, Actiniaria) on reefs of Phu Quy, Con Son, and An Thoi Islands (South China Sea, South Vietnam, and Gulf of Thailand) and a review of these groups from the coastal waters of Vietnam // J. Ichthyol. 2016. Vol. 56. No. 6. P. 832–847.
- Astakhov D.A., Ponomarev S.A., Dao Duy Thu, and Lai Duy Phuong.* Materials on fauna of anemonefishes (Perciformes, Pomacentridae, Amphiprioninae) and host sea anemones (Cnidaria, Actiniaria) from Con Son Islands (South China Sea, Southern Vietnam) // J. Ichthyol. 2008. Vol. 48. No. 9. P. 707–713.
- Bridge T., Scott A., Steinberg D.* Abundance and diversity of anemonefishes and their host sea anemones at two mesophotic sites on the Great Barrier Reef, Australia // Coral Reefs. 2012. Vol. 31. P. 1057–1062.
- Dunn D. F.* The clownfish sea anemones: Stichodactylidae (Coelenterata, Actiniaria) and other sea anemones symbiotic with pomacentrid fishes // Trans. Amer. Phil. Soc. 1981. Vol. 71. Pt. 1. P. 1–115.
- Fautin D.G., Allen G.R.* Field guide to anemonefishes and their host sea anemones. Revised edition. Perth: West. Aust. Mus., 1997. 159 p.
- Fautin, D.G., Crowther A.L., Wallace C.C.* 12 01. Sea anemones (Cnidaria: Anthozoa: Actiniaria) of Moreton Bay / In Proceedings of the Thirteenth International Marine Biological Workshop. The Marine Fauna and Flora of Moreton Bay, Queensland. Eds. Davie P.J.F., Phillips, J.A. // Memoirs of the Queensland Museum – Nature. 2008. Vol. 54. No. 1. P. 35–64. Brisbane.
- Latypov Yu.Ya.* Community structure of Scleractinian reefs in the Baitylong Archipelago (South China Sea) // Asian Mar. Biol. 1995. Vol. 12. P. 27–37.



- Lee K.-M., Xie J. Y., Sun Y., Kei K., Qiu J.-W. Four dense assemblages of the bulb-tentacle sea anemone *Entacmaea quadricolor* and associated clownfish in Hong Kong // J. Mar. Biol. Assoc. U. K. 2015. Vol. 95. No 1. P. 63–68.
- Nguyen Nhat Thi, Nguyen Van Quan. Biodiversity and living resources of the coral reef fishes in Vietnam marine waters. Ha Noi: Publ. House Sci. and Tech. 2005. 120 p. (in Vietnamese).
- Satapoomin U.A preliminary checklist of coral reef fishes of the Gulf of Thailand, South China Sea // Ibid. 2000. Vol. 48. No 1. P. 31–53.
- Yusuf Y., Shibukawa K. Pomacentridae. Damsel-fishes and Anemonefishes. P. 157–168 / In Fishes of Terengganu – east coast of Malay Peninsula. Eds. Matsunuma M., Motomura H., Matsuura K. et al. Malaysia. Nat. Mus. Natur. and Sci. Univ. Malaysia Terengganu. Kagoshima Univ. Mus. 2011.

**LARGE CLONAL GROUP OF THE OBLIGATE HOST SEA ANEMONE  
*ENTACMAEA QUADRICOLOR* FOUNDED WITHOUT SYMBIOTIC  
FISHES – ENVIRONMENTAL CONDITIONS IMPACT**

**D. A. Astakhov<sup>1</sup>, O. V. Savinkin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [dmastakhov@rambler.ru](mailto:dmastakhov@rambler.ru)*

<sup>2</sup>*Severtsov Institute of Ecology and Evolution, of RAS, 33, Leninskij prospect, Moscow, 119071 Russia, e-mail: [o.savinkin@mail.ru](mailto:o.savinkin@mail.ru)*

Submitted 10.10.2017, accepted 25.12.2017

The large clonal group of the obligate host sea anemone *Entacmaea quadricolor* (Leuckart in Rüppell et Leuckart, 1828) (Anthozoa, Actiniaria, Actiniidae) was found at the station with coordinates 20°44'09.0" N and 107°08'55.8" E in the water area of Cat Ba Islands in the Tonkin Gulf. This clonal group was located on stony bottom (surrounded by sands) at a depth of 4 m, had an area of about 15 m<sup>2</sup>, consisted of hundreds of host sea anemones, but was not inhabited by anemonefishes. Large clonal groups of host sea anemone *E. quadricolor* uninhabited by anemonefishes were not previously noted in other parts of the coastal waters of Vietnam. Comparison of the investigated water area with the waters of Hong Kong showed their similarity in temperature and hydrological parameters with more turbidity in Cat Ba. In the waters of Hong Kong huge fields of host sea anemone *E. quadricolor* are marked by an extremely low density of anemonefishes: 0.07–0.26 fishes per m<sup>2</sup>. From this it follows that the environmental conditions in the waters of Hong Kong and especially of Cat Ba Islands are extreme for the habitat of anemonefishes, even for *Amphiprion clarkii*. Probably single specimens of anemonefishes can be found in Cat Ba region when more extended studies of large clonal groups of the host sea anemone *E. quadricolor* are carried out.

**Keywords:** host sea anemones, Actiniaria, Actiniidae, *Entacmaea quadricolor*, anemonefishes, Pomacentridae (Amphiprioninae), Gulf of Tonkin, Vietnam.

**References**

- Astakhov D.A. Fauna and biology of Anemonefishes (Pomacentridae, Amphiprioninae) and symbiotic sea anemones (Coelenterata, Actiniaria) from Khanhhoa Province (South Vietnam) I Kongr. ikhtologov Rossii, Tezisy dokladov (The I Congr. of Russian Ichthyologists, Abstracts of Papers), Moscow: VNIRO, 1997, p. 9.
- Astakhov D.A. Species composition of anemonefishes (Perciformes, Pomacentridae) and their host sea anemones (Cnidaria, Actiniaria) in the Khanhhoa Province (South Vietnam), *J. Ichthyol.*, 2002, Vol. 42, No. 1, pp. 37–50.

- Astakhov D.A.* Fauna of anemonefishes (Perciformes, Pomacentridae, Amphiprioninae) and host sea anemones (Cnidaria, Actiniaria) of the Bach Long Vi Island (South China Sea, Gulf of Tonkin, Northern Vietnam), *J. Ichthyol.*, 2012, Vol. 52, No. 9, pp. 661–663.
- Astakhov D. A., Savinkin O. V., Ponomarev S. A.* Fauna of anemonefishes (Pomacentridae, Amphiprioninae) and their host sea anemones (Cnidaria, Actiniaria) on reefs of Phu Quy, Con Son, and An Thoi Islands (South China Sea, South Vietnam, and Gulf of Thailand) and a review of these groups from the coastal waters of Vietnam, *J. Ichthyol.*, 2016, Vol. 56, No. 6, pp. 832–847.
- Astakhov D.A., Ponomarev S.A., Dao Duy Thu, and Lai Duy Phuong.* Materials on fauna of anemonefishes (Perciformes, Pomacentridae, Amphiprioninae) and host sea anemones (Cnidaria, Actiniaria) from Con Son Islands (South China Sea, Southern Vietnam), *J. Ichthyol.*, 2008, Vol. 48, No. 9, pp. 707–713.
- Allen G.R.* Damselfishes of the world. Mergus Verlag.: Melle, Germany, 1991, 171 p.
- Allen G.R., Erdmann M.V.* Reef fishes of the East Indies, Vol. I–III, Perth. Australia: Tropical Reef Res., 2012, 1292 p.
- Allen G.R., Drew J., Kaufman L.* Amphiprion *barberi*, a new species of anemonefish (Pomacentridae) from Fiji, Tonga, and Samoa, *Aqua. Int. J. Ichthyol.*, 2008, Vol. 14, No. 3, pp. 105–114.
- Bridge T., Scott A., Steinberg D.* Abundance and diversity of anemonefishes and their host sea anemones at two mesophotic sites on the Great Barrier Reef, Australia, *Coral Reefs*, 2012, Vol. 31, pp. 1057–1062.
- Dolgikh I.P., Shurunov A.I.* Oceanographic studies of Soviet – Vietnam TINRO Expedition, *Okeanologiya*, 1962, Vol. 2, No. 2, pp. 368–371.
- Dunn D.F.* The clownfish sea anemones: Stichodactylidae (Coelenterata, Actiniaria) and other sea anemones symbiotic with pomacentrid fishes, *Trans. Amer. Phil. Soc.*, 1981, Vol. 71, Pt. 1, pp. 1–115.
- Fautin D.G., Allen G.R.* Field guide to anemonefishes and their host sea anemones. Revised edition. Perth: West. Aust. Mus., 1997, 159 p.
- Fautin, D.G., Crowther A.L., Wallace C.C.* Sea anemones (Cnidaria: Anthozoa: Actiniaria) of Moreton Bay, In Proceedings of the Thirteenth International Marine Biological Workshop. The Marine Fauna and Flora of Moreton Bay, Queensland, Eds. Davie P.J.F., Phillips, J.A., *Memoirs of the Queensland Museum — Nature*, 2008, Vol. 54, No. 1, pp. 35–64, Brisbane.
- Gur'yanova E.F.* Fauna of the Gulf of Tonkin and habitation conditions, in *Issledovaniya fauny morei. Fauna Tonkinskogo zaliva i usloviya ee sushchestvovaniya* (Investigation of marine fauna. Fauna of the Gulf of Tonkin and habitation conditions). Ed. Bykhovskii, B.E. Leningrad: Nauka, 1972, Vol. 10 (18), pp. 22–146.
- Latypov Yu.Ya.* Reefs and communities of Scleractinia in Western Baitylong Archipelago (South China Sea), *Biologiya Morya*, 1992, No. 1/2, pp. 17–26.
- Latypov Yu.Ya.* Community structure of Scleractinian reefs in the Baitylong Archipelago (South China Sea), *Asian Mar. Biol.*, 1995, Vol. 12, pp. 27–37.
- Latypov Yu.Ya.* Korallovye rify V'etnama (Coral Reefs of Vietnam), Moscow: Nauka, 2007, 158 p.
- Lee K.-M., Xie J. Y., Sun Y., Kei K., Qiu J.-W.* Four dense assemblages of the bulb-tentacle sea anemone *Entacmaea quadricolor* and associated clownfish in Hong Kong, *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, 2015, Vol. 95, No. 1, pp. 63–68.
- Nguyen Nhat Thi, Nguyen Van Quan.* Biodiversity and living resources of the coral reef fishes in Vietnam marine waters, Ha Noi: Publ. House Sci. and Tech., 2005, 120 p. (in Vietnamese).
- Satapoomin U.A.* Preliminary checklist of coral reef fishes of the Gulf of Thailand, South China Sea, *Ibid.*, 2000, Vol. 48, No. 1, pp. 31–53.
- Yusuf Y., Shibukawa K.* Pomacentridae. Damselfishes and Anemonefishes. pp. 157–168, In *Fishes of Terengganu – East coast of Malay Peninsula*. Eds. Matsunuma M., Motomura H., Matsuura K. et al. Malaysia, Nat. Mus. Natur. and Sci. Univ. Malaysia Terengganu, Kagoshima Univ. Mus., 2011.

## РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВАРИЙНОГО РАЗЛИВА СУДОВОГО ТОПЛИВА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КАРСКОГО МОРЯ

И.П. Трубкин<sup>1</sup>, И.А. Немировская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт экологии  
(ФГБУ ВНИИЭкологии), г. Москва, e-mail: [trubkin.ivan@bk.ru](mailto:trubkin.ivan@bk.ru)*

<sup>2</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [nemir@ocean.ru](mailto:nemir@ocean.ru)*  
Статья поступила в редакцию 13.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017

По модифицированной методике с учетом подхода Харлоу и параметров ветровых волн для двух районов Карского моря проведен расчет последствий аварийного разлива судового топлива. Оценено количество выносимой на берег нефти после аварий в северном и южном участках моря в точках выброса с различным удалением от берега, а также рассчитаны площади и толщины пленок разлива на поверхности моря в различные моменты времени.

**Ключевые слова:** Карское море, судовое топливо, аварийный разлив, математическое моделирование, площадь разлива, толщина пленки

### Введение

Поступление нефти на морской берег может быть первым признаком аварийной ситуации с нефтяным загрязнением. Для определения необходимого масштаба мероприятий по очистке и привлечения соответствующей рабочей силы и выбора оборудования для ликвидации разлива необходим расчет пространственно-временных характеристик поля загрязнения на ранней стадии (Альхименко, 2004; Матишов и др., 2009; Патин, 2008, Становой и др., 2007). Особенно важно определить количество выброшенной на берег нефти, площадь и толщину пленки нефти на поверхности воды через несколько часов после аварии в условиях штормового ветра (Матишов и др., 2009). Достичь требуемой точности расчета можно только путем математического моделирования аварийных ситуаций (Становой и др., 2007; Трубкин, 2007). В этом случае в соответствии с современными представлениями об основных процессах распространения и физико-химической трансформации нефти должны учитывать: перенос под действием ветра и течений; растекание под действием сил плавучести и турбулентной диффузии; испарение; диспергирование; эмульгирование; изменение плотности и вязкости остатка на поверхности; осаждение на берега и дно.

Цель настоящих исследований: модельные расчеты пространственно-временных характеристик растекания нефти в случае аварийных разливов при штормовом ветре на прибрежных участках Карского моря. Названные характеристики отражают в первую очередь перенос и трансформацию разлива, а также количество нефти, выносимой на берег.

### Методика расчета

По условию, принятому при моделировании, предполагается выброс 100 тонн судового топлива с 1-часовой продолжительностью в северном и южном районах Карского моря (рис. 1).

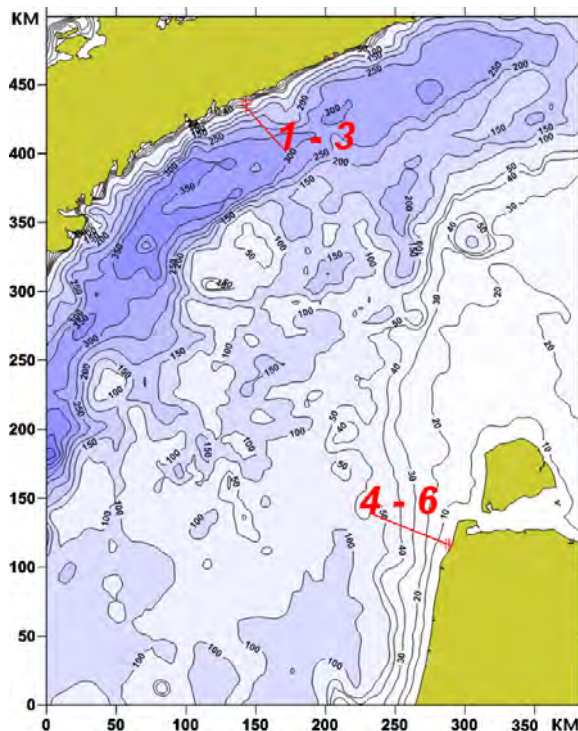


Рис. 1. Местоположение предполагаемых аварийных выбросов судового топлива (100 т, точки 1–6) с глубинами в районе работ в Карском море.

Дрейф пятна судового топлива отслеживается имитационным методом блуждающих частиц-маркеров (Озмидов, 1986). Эта методика была использована при расчетах переноса углеводородов в работах (Коротенко и др., 2003; Мишуков и др, 2007). Модель переноса топлива основана на системе дифференциальных уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с учетом условия сохранения массы и количества движения в рассматриваемой области морской акватории. В имитационном методе блуждающих частиц-маркеров поле примеси (пятно нефти) задается совокупностью большого числа отдельных частиц, в каждой из которых содержится по одной условной единице примеси. Их количество в единичном квадрате моря определяет концентрацию примеси в данном районе. Частицы участвуют в двух типах движений: переносятся существующими морскими течениями и совершают флуктуации из-за турбулентных «добавок» к полю этих течений и волнения.

Вес вещества, выбрасываемого в море одновременно или распределенного во времени с известной интенсивностью, пропорционален количеству выпускаемых частиц-маркеров. Координаты маркеров описываются уравнениями:



$$\begin{aligned}\frac{\partial x}{\partial t} &= u_w(x, y, t) + u_p(x, y, t) + u_{pr}(x, y, t) + u'(x, y, t), \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= v_w(x, y, t) + v_p(x, y, t) + v_{pr}(x, y, t) + v'(x, y, t), \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= w(x, y, t) + w'(x, y, t),\end{aligned}\tag{1}$$

где  $u_w, u_p, u_{pr}, v_w, v_p, v_{pr}$  – горизонтальные компоненты скорости среднего переноса примеси, включающие ветровые, постоянные и приливные течения, полученные по измерениям или расчетам;  $u'(x, y, t), v'(x, y, t), w'(x, y, t)$  – соответствующие пульсационные “добавки” к средним скоростям, обуславливающие турбулентное рассеяние,  $w$  – скорость опускания компонентов примеси под действием силы тяжести.

Рассеяние частиц под действием пульсационных скоростей при их расчетах задается случайным вектором  $u', v'$ , компоненты которого описываются амплитудами вектора орбитальных скоростей ветрового волнения (Трубкин, 2007; Трубкин, Филиппов, 2003) и амплитудой турбулентного (диффузионного) рассеяние частиц, компоненты которого описываются нормальным законом (Озмидов, 1986). Практически в последнем случае такое задание осуществляется численно датчиком случайных чисел с заданной дисперсией. Значение дисперсии определяется данными пульсаций скоростей течений, измеренных в рассматриваемом районе.

При отсутствии или недостаточности экспериментальных данных дисперсии скоростей течений определяются на основе теории сдвиговой неустойчивости, связывающей дисперсию компонентов скорости с критерием Ричардсона. В простейшем случае турбулентность связывается со скоростью потока формулой, которая используется в практике при отсутствии натуральных измерений дисперсии скорости (Филиппов, 1997). На основе этого соотношения в настоящей работе используются следующие формулы расчета скорости турбулентных пульсаций:

$$\sigma_u = (1 + 0,196u + 0,076v)^{1/2}, \quad \sigma_v = (1 + 0,196v + 0,076u)^{1/2}, \quad \sigma_w = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)^{1/2},$$

где:  $u, v$  – составляющие средней скорости.

Несмотря на то, что используемый имитационный метод блуждающих частиц-маркеров весьма прост в понимании выполняемых процедур, однако он приводит к большим затратам времени при вычислениях. Поэтому этот метод был модифицирован с учетом ранее известного приема расчета, как лагранжево-эйлеров подход Харлоу (Harlow, 1965). Суть этого подхода заключается в том, что источник взвеси задается набором частиц-маркеров, перемещающихся относительно неподвижной эйлеровой расчетной сетки, которая разбивается на квадратные ячейки. Элементы взвеси в ячейке представляют собой набор частиц, которые могут свободно перемещаться через сетку, но не через твердую границу. На первом

этапе расчета определяется поле скоростей дрейфа в эйлеровой системе координат. Значения вектора скорости дрейфа отсчитываются от центра ячеек. На втором этапе ведется расчет перемещения частиц, положение которых внутри ячейки определено соответствующими координатами Лагранжа. Скорость каждой частицы находится путем линейной интерполяции между центрами соседних ячеек. Частицы, вышедшие из области через «жидкую» границу, из расчета исключаются. На твердых границах используется условие полного отражения. Подход, предложенный в свое время Харлоу (Harlow, 1965) для решения задач гидродинамики, в данном случае позволил существенно ускорить вычисления.

При расчетах были использованы метеорологические данные (Справочник..., 1966–1968; Справочные данные..., 2009) возможных скоростей и направлений ветра с различной обеспеченностью для 8 румбов направлений ветра (табл. 1). По выбранным величинам скоростей, направлений ветра и батиметрическим данным были рассчитаны поля течений, ветровых и инфрагравитационных волн (Трубкин, 2007), а затем поля аварийного разлива и его некоторые параметры: площадь разлива; стандартное отклонение длины пятна разлива, среднее и максимальное значения толщины пленки.

Ежегодная повторяемость скорости ветра в районе лицензионных участков Карского моря

Направления	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Скорость, м/с	21,7	20,5	20,8	22,5	23,4	22,8	22,5	22,5

### Результаты

Согласно используемому методу, в условиях штормового ветра через 4 часа после начала выброса площадь пятна увеличивается (рис. 2а) и может достичь береговой

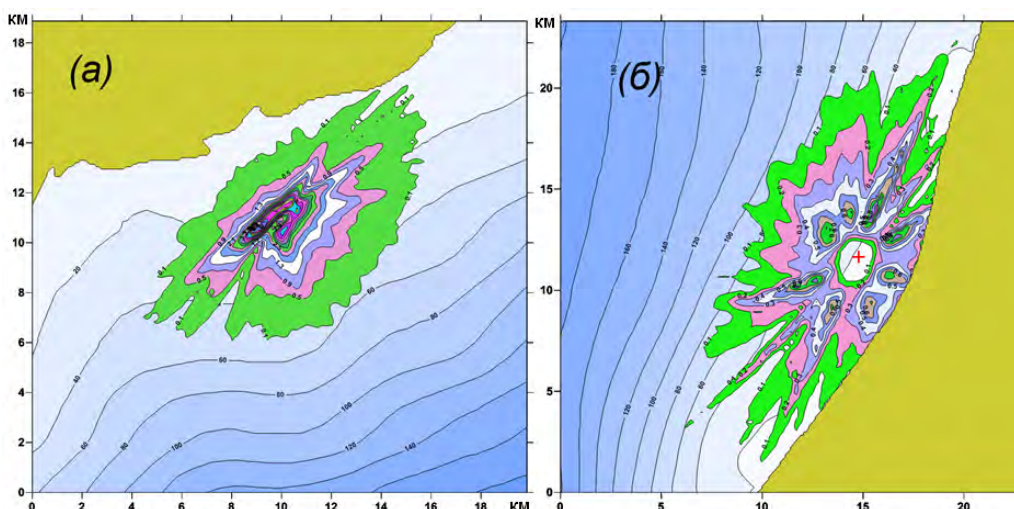


Рис. 2. Толщина пленки нефти (м<sup>3</sup>) судового топлива на поверхности воды северного (а) и южного (б) участков Карского моря после аварии в точках 2 и 5 в условиях штормового ветра через 4 часа от начала выброса (местоположение точек приведено на рис. 1).

зоны (рис. 2б). Масштаб воздействия разлива на водную среду и побережье зависит от интенсивности процессов выветривания судового топлива, его летучих фракций в атмосферу. Известные модельные оценки показывают (АМАР, 2007), что процессы выветривания являются наиболее значимыми над всей арктической территорией.

Кроме того, оказывает влияние поступление капель с поверхности в водную толщу за счет процессов обрушения волн и вертикального перемешивания. Минимальное выветривание соответствует периодам со слабыми скоростями ветра и практически полностью определяется испарением летучих фракций из пятна разлитого топлива. Максимальное выветривание происходит при сильном ветре, когда большая часть топлива попадает в виде капель в водную толщу. Интенсивность и конечный результат испарения фракций из нефтяного слика зависят, прежде всего, от температуры поверхности моря и свойств нефти (Измайлов, 1999). Фракции с температурой кипения до 150°C испаряются в течение первых суток, чуть позже – фракции с температурой кипения до 200°C. В летний и осенний периоды интенсивность испарения выше.

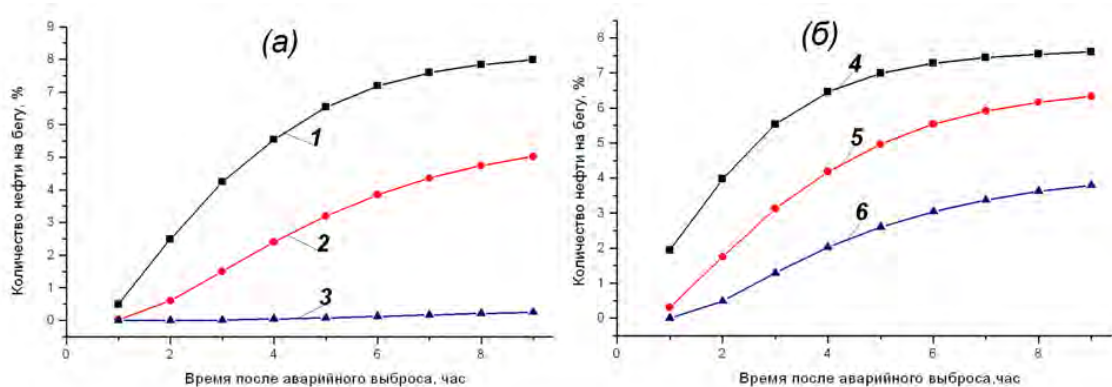


Рис. 3. Количество (%) выносимой на берег нефти после аварии в Карском моря в период времени от 1 до 9 часов после гипотетического разлива: (а) – в северном участке в точках 1–3 с удалением от берега: 1–2,96; 2–5,62; 3–8,29 км; (б) – в южном участке в точках 4–6 с удалением от берега: 4–1,53; 5–3,06; 6–4,60 км.

Полученные оценки растекания пятен судового топлива по поверхности воды участков Карского моря в случае аварийных разливов при штормовом ветре позволили определить количество выносимой на берег нефти (рис. 3), которое зависит от расстояния до берега точки выброса. Согласно расчетам, в рассматриваемом случае при минимальном удалении (около 3-х км) достигает берега лишь 8% от веса вылитого топлива. При максимальном удалении (8,3 км) аварийного выброса до 100 тонн в прибрежной зоне ощутимой угрозы выноса на берег нефти не наблюдается.

Пленка нефти с наименьшим удалением от берега (рис. 3а, кривая 1) примерно на один час является более коротко живущей, чем другие (рис. 3а, кривые 2 и 3). Такая тенденция характерна также для южного участка Карского моря (рис. 3б, кривые 4–6).

Оценка площади разлива, превышающей по толщине пленки нефти на поверхности более  $0,2 \cdot 10^{-6}$  м, представлена на рис. 4.

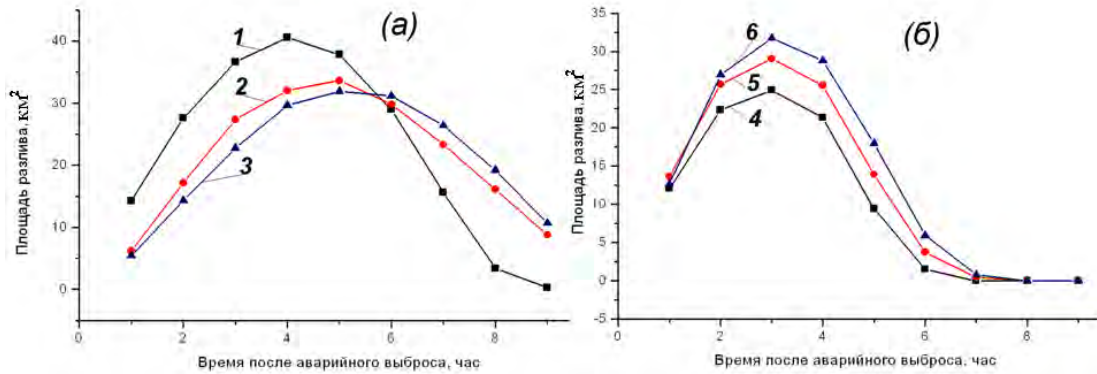


Рис. 4. Площадь разлива нефти (км<sup>2</sup>, при толщине пленки на поверхности более  $0,2 \cdot 10^{-6}$  м) после аварии в период времени от 1 до 9 часов гипотетического разлива: (а) – в северном, (б) – в южном участках. Расстояние от берега такое же, как на рис. 3.

В качестве некоторой суммарной величины рассеивания пространственного переноса блуждающих частиц-маркеров в рамках используемого метода нами выбрана величина среднеквадратического (стандартного) отклонения флуктуаций маркеров, характеризующая длину разлива в направлении его переноса (рис. 5). Изменчивость длины пятна разлива нефти на поверхности воды, характеризуемая стандартным отклонением, аналогична тенденции изменчивости кривых, обозначенных на рис. 4. Поэтому суммарная величина рассеивания пространственного переноса блуждающих частиц-маркеров, характеризуемых величиной среднеквадратического (стандартного) отклонения их флуктуаций, длину разлива в направлении его переноса (рис. 5 а, кривая 1) является примерно на один час более коротко живущей, чем другие (рис. 5 а, кривые 2 и 3). Такая тенденция характерна также для южного участка Карского моря (рис. 5б, кривые 4–6).

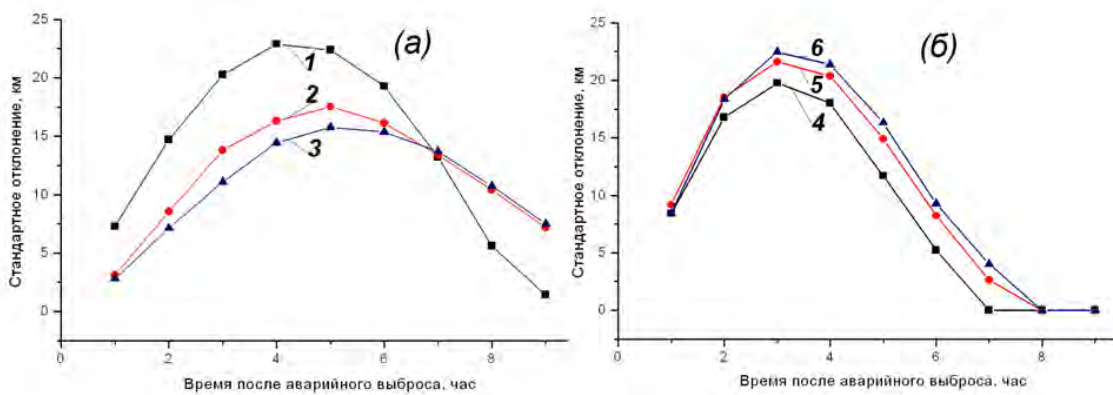


Рис. 5. Стандартное отклонение длины (км) пятна разлива нефти на поверхности воды после аварии в период времени от 1 до 9 часов гипотетического разлива: (а) – в северном, (б) – в южном участках Карского моря. Расстояние от берега такое же, как на рис. 3.



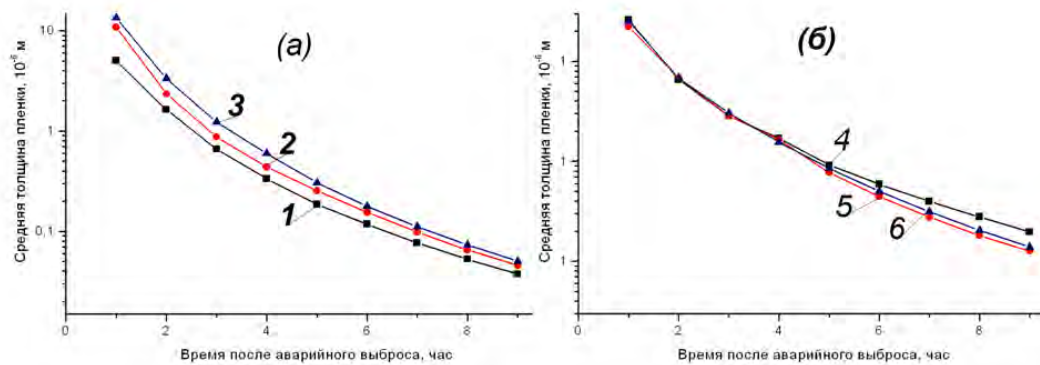


Рис. 6. Средние значения толщины пленки ( $10^{-6}$  м) пятна разлива нефти на поверхности воды после аварии в период времени от 1 до 9 после часов гипотетического разлива: (а) – в северном, (б) – в южном участках Карского моря. Расстояние от берега такое же, как на рис. 3.

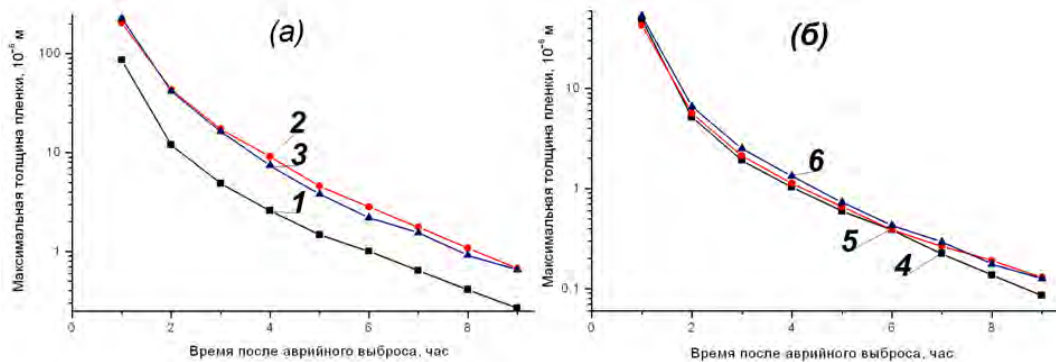


Рис. 7. Максимальные значения толщины пленки ( $10^{-6}$  м) пятна разлива нефти на поверхности воды после аварии в период времени от 1 до 9 после часов гипотетического разлива: (а) – в северном, (б) – в южном участках Карского моря. Расстояние от берега такое же, как на рис. 3.

Согласно полученным результатам (рис. 6 и 7). средние и максимальные значения толщины пленки в некоторый период времени после аварии имеют равную тенденцию изменчивости, но несколько различаются количественно по соотношению между ними. Видимо, это различие связано с характером вынуждающих сил в северном и южном участках Карского моря, формирующих перенос нефтяного пятна. Эти результаты расчетов представляют интерес при мероприятиях по мониторингу, локализации и ликвидации разлива.

### Выводы

Средние и максимальные значения толщины пленки нефти в некоторый период времени после аварии имеют одинаковую тенденцию изменчивости. Их количественные различия связаны с особенностями северного и южного участков Карского моря.

Результаты расчетов отражают пространственно-временную картину развития аварийной ситуации и позволяют выбрать обоснованную стратегию борьбы с разливом нефти или судового топлива.

Количество выносимой на берег нефти зависит от удаления от берега точки выброса. В рассматриваемом случае берега достигает лишь 8% от веса вылитой нефти при минимальном удалении на 1,53–2,96 км. При максимальном удалении аварийного выброса до 100 тонн в прибрежной зоне на расстояниях свыше 8,3 км ощутимой угрозы выноса на берег нефти не наблюдается.

Средние и максимальные значения толщины пленки нефти в некоторый период времени после аварии имеют одинаковую тенденцию изменчивости. Их количественные различия связаны с особенностями северного и южного участков Карского моря.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0016), при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-05-00356).

### Литература

- Альхименко А.И.* Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними. СПб: ОМ-Пресс, 2004. 213 с.
- Измайлов В.В.* Перенос и трансформация нефтяного загрязнения Северного Ледовитого океана // СПб: Гидрометеоздат, 1999. 140 с.
- Коротенко К.А., Дитрих Д.Е., Боуман М.Дж.* Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море // *Океанология*. 2003. Т. 43, № 4. С. 504–515.
- Матишов Г.Г., Бердников С.В., Савицкий Р.М.* Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разлива в Керченском проливе. // *Авария судов в ноябре 2007 г.* Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2009. 78 с.
- Мишуков В.Ф., Калинин В.В., Мишукова Г.И.* Модель расчета переноса и трансформации нефтяного загрязнения в Дальневосточных морях (на примере залива Петра Великого Японского моря) // *Дальневосточные моря России. Исследование морских экосистем и биоресурсов*. М.: Наука, 2007. С. 345–353.
- Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 278 с.
- Патин С.А.* Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. М.: ВНИРО, 2008. 506 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Японского и Карского морей* // *Российский морской регистр судоходства*, СПб, 2009. 356 с.
- Становой В.В., Лавренов И.В., Неглов И.А.* Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007. Вып. 77. С. 6–7.
- Справочник по климату СССР*. Л., Гидрометеоздат, Вып. 13. Части II–IV. С. 1966–1968.
- Трубкин И.П.* Ветровое волнение (взаимосвязи и расчет вероятностных характеристик) // М.: Научный мир, 2007. 264 с.
- Трубкин И.П., Филиппов Ю.Г.* Методика и некоторые результаты расчета ветровых волн в Балтийском море при оценке воздействия на окружающую среду // *Экологические системы и приборы*. 2003. № 12. С. 46–50.
- Филиппов Ю.Г.* Численное исследование колебаний уровня и течений северной части Каспийского моря при различных значениях его фонового уровня // *Водные ресурсы*. 1997. Т. 24. № 4. С. 424–429.

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Chapter 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo: AMAP, 2007. 87 p.

Harlow F.H., Welch J.E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface // *Phys. Fluids*. 1965. Vol. 8. P. 2182–2189. doi: 10.1063/1.1761178.

## CALCULATION OF SPATIAL-TIME CHARACTERISTICS OF EMERGENCY SPILL OF SHIP FUEL IN THE COASTAL ZONE OF THE KARA SEA

I.P. Trubkin<sup>1</sup>, I.A. Nemirovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Ecology. Moscow, 117628.

Znamiskie-Sadki, e-mail: [trubkin.ivan@bk.ru](mailto:trubkin.ivan@bk.ru)

<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect,

Moscow, 117997, Russia, e-mail: [nemir@ocean.ru](mailto:nemir@ocean.ru)

Submitted 13.10.2017, accepted 25.12.2017

The consequences of an emergency spill of marine fuel are calculated, based on the modified method, taking into account the Harlow approach and the parameters of wind, infra-gravity, reflected waves for two regions of the Kara Sea. The amount of oil delivered ashore after the accidents in the northern and southern parts of the sea is estimated in the emission points with various distances from shore, as well as The amount of oil delivered ashore after the accidents in the northern and southern parts of the sea at the emission points with various distances from shore is estimated, and the areas and thicknesses of oil slicks on the sea surface are calculated at various times.

**Keywords:** Kara Sea ship fuel, emergency spill, mathematical modeling, area of spill, surface film, thickness

### Referenses

Al'khimenko A.I., *Avariynnye razlivy nefti v more i bor'ba s nimi*, S-Peterburg, OM-Press, 2004, 213 p. (Alhimenko A.I., *Accidental oil spills in the sea and fight with them*, S-Peterburg, OM-Press, 2004, 213 p.)

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme), Chapter 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic, Oslo, AMAP, 2007, 87 p.

Filippov Yu.G., Modeling the circulation and transport of oil spills in the Black Sea, *Water Resources*, 1997, Vol. 24, No. 4, pp. 386–391.

Harlow F.H., Welch J.E., Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, *Phys. Fluids*, 1965, Vol. 8, pp. 2182–2189, doi: 10.1063/1.1761178.

Izmaylov V.V., *Perenos i transformatsiya neftyanogo zagryazneniya Severnogo Ledovitogo okeana*, S-Peterburg, Gidrometeoizdat, 1999, 140 p. (Transfer and transformation of oil pollution of the Arctic Ocean, S-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1999, 140 p.)

Korotenko K.A., Dietrich D.E., Bowman M.J., Numerical investigation of the level fluctuations and currents in the Northern Caspian Sea for various background levels, *Oceanology*, 2003, Vol. 43, No. 4, pp. 474–484.

- Matishov G.G., Berdnikov S.V., Savitskiy R.M.*, Ekosistemnyy monitoring i otsenka vozdeystviya razliva v Kerchenskom prolive. Avariya sudov v noyabre 2007, Rostov-na-Donu, YUNTS RAN, 2009, 78 p. (Ecosystem monitoring and assessment of the impact of the spill in the Kerch Strait. Ship Accidents in November 2007, Rostov-on-Don, UNSC RAS, 2009, 78 p.).
- Mishukov V.F., Kalinchuk V.V., Mishukova G.I.*, Model' rascheta perenosa i transformatsii neftyanogo zagryazneniya v Dal'nevostochnykh moryakh (na primere zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya). Dal'nevostochnyye morya Rossii. Issledovaniye morskikh ekosistem i bioresursov, Moskva, Nauka, 2007, 699 p. (A model for calculating the transport and transformation of oil pollution in the Far Eastern Seas (the example of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan), The Far Eastern seas of Russia, Research of marine ecosystems and bioresources, Moscow, Nauka, 2007, 699 p.)
- Ozmidov R.V.*, Diffuziya primesey v okeane. Leninrad, Gidrometeoizdat, 1986. 278 p. (Diffusion of impurities in the ocean, Leninrad, Gidrometeoizdat, 1986, 278 p.)
- Patin S.A.*, Neftnyanye razlivy i ikh vozdeystviye na morskuyu sredu i bioresursy, Moskva, VNIRO, 2008, 506 p. (Oil spills and their impact on the marine environment and bioresources, Moscow, VNIRO, 2008, 506 p.).
- Spravochnyye dannyye po rezhimu vetra i volneniya Yaponskogo i Karskogo morey, Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, Sankt-Peterburg, 2009, 356 p. (Reference data on the regime of wind and waves in the Japan and Kara Seas. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2009, 356 p.).
- Spravochnik po klimatu SSSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, Vyp. 13, Chasti II-IV 1966–1968 (Reference book on the climate of the USSR, Leninrad, Gidrometeoizdat, Iss. 13, Parts II-IV of 1966–1968).
- Stanovoy V.V., Lavrenov I.V., Neelov I.A.*, Sistema modelirovaniya razlivov nefti v ledovityh moryah, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2007, Vol. 77. pp. 6–7.
- Trubkin I.P.*, Vetrovoye volneniye (vzaimosvyazi i raschet veroyatnostnykh kharakteristik), Moskva, Nauchnyy Mir, 2007, 264 p. (Wind turbulence (interrelations and calculation of probability characteristics), Moscow, Scientific World, 2007, 264 p.)
- Trubkin I.P., Filippov Yu.G.*, Metodika i nekotoryye rezul'taty rascheta vetrovykh voln v Baltiyskom more pri otsenke vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu, *Ekologicheskkiye sistemy i pribory*, 2003, No.12, pp. 46–50 (The methodology and some results of calculating wind waves in the Baltic Sea in assessing the impact on the environment. *Ecological systems and devices*, 2003, No.12, pp. 46–50).



**MODELING OF SUSPENDED MATTER DISTRIBUTION  
IN MARINE COASTAL AREAS:  
1. DESCRIPTION OF THE SM-MODEL**

**К.А. Podgornyi<sup>1</sup>, A.V. Leonov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Atlantic Research Institute of Fisheries and Oceanography  
ul. Dm. Donskoy, 5. Kaliningrad, 236000, Russia, e-mail: [kapborok@mail.ru](mailto:kapborok@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36,  
Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [leonov@ocean.ru](mailto:leonov@ocean.ru)*

Submitted 05.09.2017, accepted 25.12.2017

A methodology is considered for developing a mathematical model to study the distribution of suspended matter concentrations in coastal marine areas. This model assesses the consequences of dredging (namely the disturbance of the natural state of marine environment for bioresources), it reproduces the formation of suspended matter and its subsequent transport in the aquatic environment in shallow sea bays and offshore water areas. This problem is solved in two basic stages: at the first stage – the system of equations of hydrodynamics (the equations of the theory of "shallow water") is numerically integrated and the values of the mean components of the flow velocity are determined; and at the second stage – the system of turbulent diffusion equations is integrated, the processes of sedimentation of suspended matter, resuspension of bottom sediments, arrival of suspended matter from distributed point sources, their redistribution in the aquatic environment and the accumulation of residual quantities on the bottom are taken into account.

**Keywords:** equations of the theory of «the shallow water»; the system of advection and turbulent diffusion equations; initial and boundary conditions

### **Introduction**

The spread of suspended matter (SM) in the coastal marine shallow water areas, bays and estuaries of rivers under natural conditions, as well as in the performance of various works in which an external mechanical action (for example, bypassing<sup>1</sup>) on bottom sediments is assumed, is a complex, multiscale and a multidimensional process. In the mixing zones of river and sea waters in river mouths, there are so-called "marginal filters" (Lisitsyn, 1994) in which important ecosystem processes occur (differential deposition of particles of different size composition, flocculation and

---

<sup>1</sup> Bypassing – a set of works with the purpose of mining building materials as well as restoration / creation of natural or artificial beaches. In particular, bypassing is carried out the excavation of soil and the mechanical movement of deposits from one section of the marine area to another.

coagulation dissolved substances and SM, bioassimilation and biofiltration). The rates of chemical transformations of various components in the aquatic environment, including the rates of biochemical transformation of biogenic substances (BS) in such zones are much higher than in the open sea. Biological processes include an activity of living organism community (from bacteria to zooplankton), and in a number of cases the role of macrophytes is important. Next processes are carried out at the expense of biological processes: the transformation of dissolved substances and SM, in particular, BS; transfer of dissolved substances into SM; biofiltration or extraction of SM from water and transferring it to a bottom sediment. Thus, marine coastal shallow water areas, bays and mouths of rivers are functioning as unique systems, similar to the "chemical and biochemical reactors" (Lisitsyn, 1994) under relatively shallow depths and low temperatures. Dissolved organic matter (DOM) and SM in natural waters play a key role in various natural processes in the marine environment.

Their role is especially great in shallow water areas and shelf areas where concentrations of DOM and SM can be significant. For example, in the Baltic Sea, DOM concentrations are typically 3–4 times higher than in the oceans (Maciejewska, Pempkowiak, 2014, 2015). In the waters of shallow lagoons, the content of SM is usually even higher and significantly affects the speed and direction of performed processes in these ecosystems.

Unfortunately, the processes of SM propagation are mainly studied from the point of view of hydrology, morphology, and hydrodynamics (Lisitsyn, Barenblatt, 1983), while the SM as itself is often considered as a "passive admixture" or a tracer in the modeling (Rukhovets, 1982; Ryabchenko et al., 2006; Ryanzhin et al., 1984; Molchanov et al., 2010). This approach is acceptable in solving local problems for the studying the spatio-temporal dynamics of SM that enter to the aquatic environment, for example, as a result of landfill, dredging, pipelines, bank protection measures, volley discharges from sewage treatment plants or in emergency situations. However, with a more complex task in the comprehensive study of the SM and DOM transformation processes in natural waters, in order to solve it, in addition to direct observations and laboratory experiments, the different mathematical models of aquatic ecosystems, and in particular simulation models, are necessary for the usage. There are examples of the construction and practical application of similar models (Leonov, 2008; Podgornyii, Leonov, 2013a, b).

In modern conditions, the entire complex of problems of the SM formation and distribution are especially relevant and are obligated for the consideration for the ecological justification of all projects without exception, within which any impacts on the aquatic environment are carried out and the conditions of living of aquatic biological resources are violated. Without simulation modelling it is impossible to answer on the questions related to the state of the marine environment and damage for water biological

resources when drawing up an expert opinion on the assessment of the effect for environmental protection (AEEP) for a specific project. When solving the practical problem of modeling the SM propagation in the water environment, the system of equations of hydrodynamics (two- or three-dimensional) and the system of equations of turbulent diffusion are numerically integrated with taking into account of the different processes and the different scales of turbulent exchange determined by parameters of the SM mixing for different instants of time; SM sedimentation and resuspension of bottom sediments; and in a number of cases, the conditions for the cohesion of SM particles are estimated at the water-bottom sediment interface; and also the jet effects including an important process of accelerated initial immersion of a "heavy" jet (or volley drop of soil); and the effect of flocculation associated with the cohesion of SM particles with its subsequent rapid deposition; and the arrival of SM into water from distributed (point) sources. In the winter period, it is necessary to take into account the formation and/or the presence of the ice cover (within the entire water area or on its part). In a number of cases, one should take into account the effect of density stratification of the water.

The mathematical model for investigating and forecasting the SM distribution in marine coastal areas should take into account not only the above processes and conditions, but also other important phenomena (Arkhipov et al., 2004): the multidispersity of SM and/or differences in the granulometric composition of suspensions polluting the water area (this leads to differential precipitation of different SM fractions); the turbulent nature of the SM transport in the considered design area and, as a consequence, the need to take into account the dependence of the horizontal diffusion coefficients on the linear size of the contamination zone; and space-time variability of the velocity and flow direction fields; and spatial inhomogeneities of the flow velocity field within the water area; and possible long-term (from several days to several months) nature of engineering works; and the possibility of continuous (or episodic) movement of the SM source in the water area during the work.

Thus, the mathematical model should use an information on the hydro-meteorological and hydrological features of the work area and modern ideas about the physicochemical and biological processes that determine the SM formation and distribution in the water environment; and also the technical characteristics of equipments applying of which leads to the SM appearance in the coastal zone of the sea, and a specific technological scheme of dredging and other required works.

The problem of modeling the space-time dynamics of flow fields considers the case when the horizontal dimensions of the water body are much greater than its depth; and there is no pronounced seasonal thermocline in the water body and there is a relative vertical homogeneity (or single-layer structure) of currents. In this case, the applying the approximations of the theory of "the shallow water" (or the Saint-Venant

system of equations) is permissible. Models of thermo-hydrodynamic processes are quite common in which these or other variants of system equations of the shallow water are used (for example, models of water circulation in shallow lakes, reservoirs, bays and seas, sediment dynamics model, and conditions of bottom sediment accumulation, distribution of conservative and non-conservative impurities in watercourses, shallow lakes and sea bays).

Despite a number of simplifications, the mathematical models and numerical methods for calculating currents in shallow-water continental water bodies (lakes, reservoirs, sea bays) and coastal marine areas remain quite complex. The hydrodynamic problems of the theory of shallow water are formulated in the form of initial-boundary value tasks. At the same time, the necessary information (morphometric data, impact functions, initial state of the process and conditions at the boundaries) should be set fairly accurately in the space-time region where the motion of the water mass is considered. It is also required to propose an economical numerical method for solving a system of equations that are nonlinear in their structure. The totality of all characteristics ensures the quality of the mathematical model.

### The system of equations according theory of the shallow water

It is represented by the Saint-Venant system of equations:

$$U = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} u dz, V = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} v dz. \quad (1.1)$$

$$H = h + \zeta. \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - K_T \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fV + g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} - \frac{1}{\rho_w H} \tau_x^s = 0, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - K_T \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fU + g \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} - \frac{1}{\rho_w H} \tau_y^s = 0, \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0, \quad (1.5)$$

where  $U, V$  are the vector projections of the average velocity along the coordinate axis (the axis  $OX$  is directed to the east,  $OY$  – to the north,  $OZ$  – upward);  $\zeta$  – elevation of the free surface above the reference level surface;  $h$  is the distance from the reference level surface to the bottom;  $H$  is the total depth of the water body at a given time;  $K_T$  – coefficient of horizontal turbulent exchange;  $f$  – Coriolis parameter;  $g$  – acceleration of gravity;  $\tau_x^s, \tau_y^s$  – the projection of the tangential wind stress on the coordinate axis;  $\rho_w$  – density of water;  $C$  is the Chezy coefficient.



In accordance with the Van Dorn law, at the developed turbulence of the flow, the following relationships are taken to calculate the components of the tangential wind stress:

$$\tau_x^s = \theta \rho_a W_a^2 \cos \alpha_w, \tau_y^s = \theta \rho_a W_a^2 \sin \alpha_w, \quad (1.6)$$

where  $W_a$  – wind speed over the water body,  $\alpha_w$  – wind direction,  $\rho_a$  – air density,  $\theta$  – coefficient of hydraulic resistance on the water surface. The coefficient of Chezy,  $C$ , takes into account the loss of energy to overcome frictional forces depending on the degree of roughness and depth of the water body. It is calculated using semi-empirical formulas. In particular, the Manning and Pavlovsky formulas are widely used:

$$C = \frac{1}{n_r} \sqrt[6]{R}, \quad (1.7)$$

$$C = \frac{1}{n_r} R^\sigma, \quad (1.8)$$

where  $n_r$  – coefficient of roughness determined by special tables or calculated by the empirical ratio, depending on the average height of the roughness protrusions  $\xi$ :

$$n_r = \frac{0.13}{\sqrt{g}} \sqrt[6]{\xi}; R \text{ is the hydraulic radius (in practice, } R \text{ is the total depth of flow } H). \text{ The}$$

exponent in formula (1.8) is calculated from the empirical relationship that establishes a relationship between  $\sigma$  от  $n_r$  and  $R$ :

$$\sigma = 2.5\sqrt{n_r} - 0.75\sqrt{R}(n_r - 0.10) - 0.13. \quad (1.9)$$

We supplement the system (1.3)–(1.5) with the following boundary conditions:

1) the noflow condition is fixed on the solid contour of the computational domain (or the normal component of the average velocity of the flow is equal to zero:  $\vec{U}_{n_b} = 0$ ); and

2) the radiation condition is used on the liquid boundary of the computational domain:

$$\vec{U}_{n_b} = \zeta \sqrt{\frac{g}{H}}, \text{ если } \vec{U}_{n_b} \geq 0 \text{ and } \begin{cases} \vec{U}_{n_b} = \zeta \sqrt{\frac{g}{H}}, \text{ if } \vec{U}_{n_b} \leq 0, \\ \vec{U}_{\tau_b} = 0, \end{cases} \quad (1.10)$$

where  $\vec{U}_{\tau_b}$  is the tangential component of the average velocity along the depth of the flow at the liquid boundary of the calculated region. In the confluence of rivers (if any), the energy condition is used:  $U_n^2 + g\zeta = \frac{Q_{river}^2}{W_{river}^2 h_{river}^2}$  (where  $Q_{river}$  – flow rate;  $W_{river}$ ,  $h_{river}$  – respectively the width and the average depth in the alignment of the river).

As initial conditions, zero velocity and level values (rest state) will be used. When the wind changes over the water body, the initial fields are the values of the flow and elevation velocities obtained at the previous time step.

For the numerical solution of the modified Saint-Venant system of equations, an implicit spatially and time-separated difference scheme is used with the applying the alternating direction method (Podgornyii, 2003) (realized with the aid of the *C*-grid of Arakawa). For the stability of the computational process, the system of equations (1.1) – (1.5) is modified near the boundary so that the differential operator for the advective terms on the boundary is the differentiation operator in the direction tangential to the boundary (Baklanovskaya et al., 1979). Modified equations are approximated on the selected spaced grid by difference equations that can be solved by the sweep method.

The time step  $\tau$  for solving the equations depends on the grid steps  $(\Delta s)_x$ ,  $(\Delta s)_y$  on the spatial coordinates. When choosing  $\tau$ , it is necessary to ensure that the criterion for stability of computations is satisfied on the basis of the Courant-Friedrichs-Levy criterion (CFL):  $\left( \frac{\tau}{(\Delta s)_{x,y}^{max}} \right) \sqrt{gH} < 1$ , or  $\tau < \frac{(\Delta s)_{x,y}^{max}}{\sqrt{gH}}$ , where  $(\Delta s)_{x,y}^{max}$  – is the largest step of the grid with respect to spatial coordinates.

To parameterize the coefficient of horizontal turbulent exchange  $K_T$ , different approaches are used, and in the simplest case, its constant value is used (Chubarenko, Tchepikova, 2001). To guarantee the computational stability, it is necessary to take into account its dependence on the grid steps  $(\Delta s)_x$ ,  $(\Delta s)_y$  on the spatial coordinates (*OX* and *OY*, respectively), and also on the time step (estimated by the criterion of CFL). In calculations, the specific value of the coefficient  $K_T$  is found from the relationship:  $K_T = 0.02(\Delta s)_x(\Delta s)_y/\tau$  (MIKE 21..., 2012). In a number of models (Klevanny, Smirnova, 2009; Matishov et al., 2009; Klevanny et al., 2001) at the construction of numerical schemes for estimating the coefficient of horizontal turbulent exchange, the Smagorinsky parametrization (Smagorinsky, 1963) is used. It is this parametrization that will be used to calculate the coefficient values  $K_T$  and to estimate the coefficient of horizontal turbulent diffusion (equation (2.39)). To date, other approaches for calculations have been widely used (Fahmy et al., 2013; Lai, 2010; MIKE 21..., 2012) – for the parametric closure of the system of equations (1.1)–(1.5), turbulent exchange models are used (most often,  $k - \varepsilon$  – models of turbulent exchange (Cebeci, 2004; Rodi, 1980). The application of other approaches and models of turbulence as well as their effective practical numerical realization are considered in (Cebeci, 2004).

### System of equations for processes of advection and turbulent diffusion

In a general form, the system of equations for describing advection and turbulent diffusion takes into account sedimentation of SM, resuspension of bottom sediments as well as the receipt of SM with different granulometric composition from distributed (point) sources, connected with engineering works on a particular site. When using convective terms in a non-divergent (characteristic) form, this system of equations can be represented as follows:

$$\begin{aligned} \partial (C_n)_{sed}^w / \partial t + U \partial (C_n)_{sed}^w / \partial x + V \partial (C_n)_{sed}^w / \partial y + (W_s)_n \partial (C_n)_{sed}^w / \partial z = \\ = (A_\eta)_n \Delta_\eta (C_n)_{sed}^w + F_n(t, (C_1)_{sed}^w, \dots, (C_n)_{sed}^w), n = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

here:  $(C_n)_{sed}^w$  – the values of SM concentrations in water for the size fraction  $n$  (in the future, instead of the designation  $(C_n)_{sed}^w$ , we will use its brief notation  $C_n$ );  $U, V$  are the projections of the vector of the average velocity along the axis of coordinates  $OX$  and  $OY$ , respectively, the axis  $OX$  is directed to the east, the axis  $OY$  – to the north;  $(W_s)_n$  – rates of gravitational settling of SM (sedimentation rate of each size fraction of SM) in the flow, taking into account the difference in sedimentation rates of SM in the flow compared to standing water;  $OZ$  – vertical coordinate, directed downwards;  $(A_\eta)_n$  – coefficient of horizontal turbulent diffusion for the size fraction  $n$ ;  $\Delta_\eta$  – two-dimensional Laplace operator;  $F_n \equiv Rate(C_n)$  – a functional operator used to calculate the rate of change in the concentration of a given fraction of SM;  $N$  is the total number of size fractions;  $t$  is time.

The formulation of boundary and initial conditions depends on the hydrological features of a particular water body, the research tasks and the availability of observational data. In particular, the boundary conditions can be as follows:

- on the entire solid boundary, in the outflows of the outflowing rivers (if any) and at the open border with the direction of water movement beyond the calculation area, the condition that the derivative in the direction of the external normal to the boundary of the water body is zero:

$$\partial C_n / \partial \mathbf{n}_b = 0. \quad (2.2)$$

- on the open border with the direction of movement of water inside the calculation area, the first boundary condition is set – specific values of the concentrations of individual SM fractions on this border are specified;
- in the areas of inflowing rivers (if any), the condition is given

$$\partial C_n / \partial \mathbf{n}_b - \mathbf{V}_n (C_n - C_{n\_river}) = 0, \quad (2.3)$$

where  $V_n$  is the projection of the water flow velocity on the outer normal to the boundary,  $C_{n\_river}$  is the concentration of SM components in the aqueous medium (for each size fraction  $n$ ).

It follows from equation (2.1) that the evolution of SM fields (of a particular fraction  $n$ ) is determined by the advective transfer of SM along the trajectories of the particles, the gravitational sedimentation of SM, turbulent diffusion, sedimentation of SM, and the resuspension of bottom sediments depending on the conditions of hydrodynamics (the structure of the flow field and the effect of water waves).

In the scheme of numerical integration of the system of equations (2.1), the method of splitting by physical processes and spatial coordinates is used (Marchuk, 1988; Marchuk et al., 1987; Podgornyii, 2003; Samarskii, Vabishchevich, 1999a, b). The general splitting scheme includes four stages of integration of the system (2.1). In the first stage, the advective transfer equations for each of the isolated SM fractions along the particle trajectories are solved on the time interval:

$$\partial C_n / \partial t + U \partial C_n / \partial x + V \partial C_n / \partial y = 0, n = \overline{1, N} \quad (2.4)$$

with the initial conditions  $C_n^{k+1/4}(t_k) = C_n^k$ .

At the second stage, the equations describing the processes of gravitational deposition of SM are solved in the same time interval:

$$\partial C_n / \partial t + (W_s)_n \partial C_n / \partial z = 0, n = \overline{1, N} \quad (2.5)$$

with the initial conditions  $C_{n\_PM}^{k+2/4}(t_k) = C_{n\_PM}^{k+1/4}(t_k + \tau)$ .

In the third stage, the equations of turbulent exchange of SM for each fraction  $n$  are solved in the same time interval:

$$\partial C_n / \partial t = (A_\eta)_n \Delta_\eta(C_n), n = \overline{1, N} \quad (2.6)$$

with the initial condition  $C_n^{k+3/4}(t_k) = C_n^{k+2/4}(t_k + \tau)$ .

At the last (fourth) stage, for each selected fraction  $n$ , the system of equations is solved that describes the local processes of sedimentation of SM and resuspension of bottom sediments as well as the receipt of SM from point sources:

$$\partial C_n / \partial t = F_n(t, C_1, \dots, C_n), n = \overline{1, N} \quad (2.7)$$

with the initial condition  $C_n^{k+1}(t_k) = C_n^{k+3/4}(t_k + \tau)$ .

To integrate the system of equations (2.7) which for each integer node of the grid region describes the processes of deposition of SM (for each of the  $n$  isolated fractions), the perturbation of the bottom sediments and the incoming of SM from distributed point sources, the Runge-Kutta-4 method is used in the Gill modification. In accordance with the accepted sequence of splitting of the initial problem, at the last stage at each inner

point of the grid region, a system of equations is solved that describes the local processes of changing the SM concentrations in water environment:

$$\partial C_n / \partial t = F_n(t, C_1, \dots, C_n), \quad (n = \overline{1, N}) \quad (2.8)$$

with the initial condition  $C_n^{k+1}(t_k) = C_n^{k+3/4}(t_k + \tau)$ . Values  $C_n$  ( $n = \overline{1, N}$ ) at this point are stored in the two-dimensional array  $Y_{n,m}$  ( $n = \overline{1, N}, m = \overline{0, 4}$ ) in which the initial conditions are written in the form of the equation:  $Y_{n,0} = C_n^{k+3/4}(t_k + \tau)$  ( $n = \overline{1, N}$ )

An auxiliary two-dimensional array is also used,  $Q_{n,m}$  ( $n = \overline{1, N}, m = \overline{0, 4}$ ), in which zero initial values are given:  $Q_{n,0} = 0$  ( $n = \overline{1, N}$ ),  $t_0 = t_k$ . At the beginning of the calculation, a special set of coefficients is determined by this method:  $A_1 = 0,5$ ,  $A_2 = 1 - \sqrt{0,5}$ ,  $A_3 = 1 + \sqrt{0,5}$ ,  $A_4 = 1/6$ ,  $B_1 = 2,0$ ,  $B_2 = 1$ ,  $B_3 = 1$ ,  $B_4 = 2,0$ ,  $C_1 = 0,5$ ,  $C_2 = 1 - \sqrt{0,5}$ ,  $C_3 = 1 + \sqrt{0,5}$ ,  $C_4 = 1/2$ . Gill's procedure begins with setting the index  $m = 1$ . Next, value  $K_{n,m} = F_n(t_{m-1}, C_{1,m-1}, \dots, C_{n,m-1})$  ( $n = \overline{1, N}$ ) are calculated, as well as values:

$$Y_{n,m} = Y_{n,m-1} + (A_m(\tau K_{n,m} - B_m Q_{n,m-1})),$$

$$Q_{n,m} = Q_{n,m-1} + 3(A_m(\tau K_{n,m} - B_m Q_{n,m-1})) - C_m \tau K_{n,m} \quad (n = \overline{1, N}).$$

This procedure is repeated successively for values  $m = 2, 3, 4$ , starting with the step  $K_{n,m}$ . As the calculations are performed,  $t_m$  values change in the following way:  $t_1 = t_0 + \tau/2 = t_k + \tau/2$ ,  $t_2 = t_0 + \tau/2 = t_k + \tau/2$ ,  $t_3 = t_0 + \tau = t_k + \tau$ . At the end of this process, consisting of four steps, the values  $C_n(t_k + \tau)$  ( $n = \overline{1, N}$ ) will turn out to be  $Y_{n,4}$  ( $n = \overline{1, N}$ ).

Calculation of the rate of change in the SM concentrations in water due to the processes of SM sedimentation, stirring up the bottom sediments and incoming of SM into water from distributed point sources at each step  $\tau$  in time is carried out in the model according to the following general formula:

$$Rate(C_n) = -f_{sed}(U^{curr}; U^{wave})_{(C_n)_{sed}^W} + f_{ReSusp}(U^{curr}; U^{wave})_{(C_n)_{sed}^B} + v_{PointSource} (C_n)_{sed}^{PointSource}, \quad (n = \overline{1, N}) \quad (2.9)$$

where  $(C_n)_{sed}^W$  – current values of the SM concentrations in water for each size fraction  $n$ ;  $(C_n)_{sed}^B$  – current values of SM concentrations in the bottom sediment;  $(C_n)_{sed}^{PointSource}$  – values of SM concentrations incoming from distributed point sources;  $v_{PointSource}$  – velocity of intake of SM from point sources. Changes in SM concentrations in water for each  $n$ -th isolated fraction depend on the flow velocity and the characteristics of water



waves. This dependence is taken into account in the model by introducing terms  $-f_{sed}(U^{curr}; U^{wave})_{(C_n)_{sed}^w}$  and  $f_{ReSusp}(U^{curr}; U^{wave})_{(C_n)_{sed}^B}$  in formula (2.9), which describe the corresponding processes of SM sedimentation and resuspension of the bottom sediment. The arguments of the functions  $f_{sed}(U^{curr}; U^{wave})$  and  $f_{ReSusp}(U^{curr}; U^{wave})$  are the values of  $U^{curr}$  and  $U^{wave}$ . These values are the average vertical velocity of water flow and the rate of variable flow initiated by water waves.

The velocities of the processes of SM sedimentation and the bottom sediment resuspension depend on  $\tau_{bottom}$  – the tangential stress at the bottom (calculated by  $U^{curr}$  and  $U^{wave}$ ). Write the functions  $f_{sed}(U^{curr}; U^{wave})$  and  $f_{ReSusp}(U^{curr}; U^{wave})$  in a general form (Marchuk, 1988; Marchuk et al., 1987; Podgorny, 2003; Samarskii, Vabishchevich, 1999a, b):

$$f_{sed}(U^{curr}; U^{wave}) = \begin{cases} (W_s)_n = 0, & \tau_{bottom} \geq \tau_{C_n}^{crit\_sed}, \\ (W_s)_n = U_{C_n}^{sed} \cdot \left(1.0 - \frac{\tau_{bottom}}{\tau_{C_n}^{crit\_sed}}\right), & \tau_{bottom} < \tau_{C_n}^{crit\_sed}; \end{cases} \quad (2.10)$$

$$f_{ReSusp}(U^{curr}; U^{wave}) = \begin{cases} 0, & \tau_{bottom} \leq \tau_{C_n}^{crit\_resusp}, \\ U_{C_n}^{resusp} \cdot \left(\frac{\tau_{bottom}}{\tau_{C_n}^{crit\_resusp}} - 1.0\right), & \tau_{bottom} > \tau_{C_n}^{crit\_resusp}, \end{cases} \quad (2.11)$$

where  $U_{C_n}^{sed}$ ,  $U_{C_n}^{resusp}$  are the rate of SM sedimentation and stirring respectively for a given layer of water ( $n = \overline{1, N}$ );  $\tau_{C_n}^{crit\_sed}$  and  $\tau_{C_n}^{crit\_resusp}$  – the critical values of the tangential stress at the bottom, which determine the beginning of the SM sedimentation ( $n = \overline{1, N}$ ) and the stirring up of the sediments ( $n = \overline{1, N}$ ), respectively.

It follows from formulas (2.10) and (2.11) that the corresponding sedimentation rates of a given SM fraction are a function of the ratio  $\frac{\tau_{bottom}}{\tau_{C_n}^{crit\_sed}}$  ( $n = \overline{1, N}$ ), and the

disturbances of the bottom sediments are a function of the ratio  $\frac{\tau_{bottom}}{\tau_{C_n}^{crit\_resusp}}$  ( $n = \overline{1, N}$ ).

Depending on the ratio  $\tau_{bottom}$  and critical values of the tangential stresses on the bottom, for the  $n$ -th fraction of SM, either SM sedimentation or stirring up of the bottom sediments may predominate.

Tangential stress  $\tau_{bottom}$  is calculated as a sum of stresses caused by the effects of water flow and wind waves on the bottom of the water body (Chao et al., 2008; Davies, Lawrence, 1994; Hipsey et al., 2006; Signell et al., 1990; Teeter et al., 2001):

$$\tau_{bottom} = \tau_{bottom}^{curr} + \tau_{bottom}^{wave}. \quad (2.12)$$

For calculation  $\tau_{bottom}$ , there are more complex nonlinear models (Glenn, Grant, 1987; Grant, Madsen, 1979; Stanev et al., 2009). In general, the tangential stress at the bottom is determined by the dynamic velocity  $u_*$ , due to both the water flow and waves:

$$\tau_{bottom} = \rho_w u_*^2, \quad (2.13)$$

where  $\rho_w$  is the density of water. Taking into account (2.12), equation (2.13) looks like this:

$$\tau_{bottom} = \rho_w \cdot \left( (u_*^{curr})^2 + (u_*^{wave})^2 \right) \quad (2.14)$$

In equation (2.14),  $u_*^{curr}$  and  $u_*^{wave}$  are the dynamic values of the velocity, due respectively to the water flow and wind waves.

Next, the density of sea water  $\rho_w(T_w, S)$  (in kg / m<sup>3</sup>) is calculated for its salinity  $S$  (in ‰) and temperature  $T_w$  (in °C):

$$\begin{aligned} \rho_w(T_w, S) = & \rho_w(T_w, 0) + S \left( 0.824439 - 4.0899 \cdot 10^{-3} T_w + 7.6438 \cdot 10^{-5} T_w^2 - \right. \\ & \left. - 8.2467 \cdot 10^{-7} T_w^3 + 5.3875 \cdot 10^{-9} T_w^4 \right) + \\ & + S^{3/2} \left( -5.72466 \cdot 10^{-3} + 1.0227 \cdot 10^{-4} T_w - 1.6546 \cdot 10^{-6} T_w^2 \right) + 4.8314 \cdot 10^{-4} S^2. \end{aligned} \quad (2.15)$$

The formula (2.15) is applicable for the range  $S$  (0–42 ‰), and  $T_w$  – for the freezing temperature of seawater (from  $S > 0$  ‰) to 40 °C. The value  $T_{wf}$ , °C, for the range  $S$  (1–40 ‰) is calculated by the equation (Kester, 1974):

$$T_{wf} = -0.0137 - 5.1990 \cdot 10^{-2} S - 7.225 \cdot 10^{-5} S^2. \quad (2.16)$$

For the parametrization  $\tau_{bottom}^{curr}$  according to the "hard wall law" of Karman-Prandtl, we assume that  $(u_*^{curr})^2 \sim (U^{curr})^2$ . Taking this assumption into account, we write down that

$$\tau_{bottom}^{curr} = \rho_w C_D (U^{curr})^2, \quad (2.17)$$

where  $C_D$  is the coefficient of resistance. When using a two-dimensional version of the hydrodynamic module,  $U^{curr}$  is considered as the average vertical velocity of water displacement. In this case the value  $C_D$  is calculated using the relation:

$$C_D = 0.16 \left( 1 + \ln \left( \frac{Z_0}{Z_w} \right) \right)^{-2}, \quad (2.18)$$

where  $Z_0$  is some average scale height of the protuberances of the bottom roughness;  $Z_w$  is the depth of water at the point of calculation. The average scale height  $Z_0$  of the bottom roughness is determined by the formula  $Z_0 = D_{50}/12$ , where  $D_{50}$  is the weighted average particle size dependent on the percentage contribution of particles of

different type and particle size in the sediment layer in the water body (Stanev et al., 2009).

In shallow-water lakes, bays and lagoons, the shear stress  $\tau_{bottom}^{wave}$  under the action of wind waves on the bottom of the water body is calculated on the basis of the linear theory of wave processes, and  $\tau_{bottom}^{wave}$  is assumed to be proportional to the square of the maximum wave orbital velocity near the bottom (Jonsson, 1966; Luettich et al., 1990):

$$\tau_{bottom}^{wave} = \frac{1}{2} \rho_w f_{wave} (U_{wave}^{max})^2, \quad (2.19)$$

where  $f_{wave}$  is the coefficient of wave friction. For shallow water and linear wave theory, the speed  $U_{wave}$  of the orbital wave motion is calculated from the equation (Shore protection..., 1984):

$$U_{wave} = \frac{\pi H_{wave}}{T_{wave} sh(kZ_w)} \cos(kx - \omega t), \quad (2.20)$$

where  $H_{wave}$ ,  $T_{wave}$  are the height and period of the wave respectively;  $k = \frac{2\pi}{L_{wave}}$  – wave

number,  $L_{wave}$  – wavelength;  $\omega = \frac{2\pi}{T_{wave}}$  – angular frequency. The maximum value

$U_{wave}^{max}$  of the speed of the orbital wave motion is achieved when  $\cos(kx - \omega t) = 1$  or provided that  $kx - \omega t = 0$ . Then from equation (2.20) we obtain that

$$U_{wave}^{max} = \frac{\pi H_{wave}}{T_{wave} sh(kZ_w)}. \quad (2.21)$$

The final expression for the calculation of  $U_{wave}^{max}$  is obtained by substituting in (2.21) expression for calculating the wave number:

$$U_{wave}^{max} = \frac{\pi H_{wave}}{T_{wave} sh\left(\frac{2\pi Z_w}{L_{wave}}\right)}. \quad (2.22)$$

The length, height and period of the wave are unknown quantities in equation (2.22). For shallow water bodies, the ratio  $Z_w/L_{wave} < 1/25$  is fair. Therefore, the height and period of the wind wave for the conditions of "shallow water" is found from the expressions (Shore protection..., 1984):

$$H_{wave} = 0.283 \frac{(U_{z=10}^{wind})^2}{g} th(\xi) th \left( \frac{0.00565 \cdot \sqrt{\frac{g F_{wind}}{(U_{z=10}^{wind})^2}}}{th(\xi)} \right), \quad (2.23)$$

$$T_{wave} = 7.54 \frac{U_{z=10}^{wind}}{g} th(\xi) th \left( \frac{0.0379 \cdot \sqrt[3]{\frac{g F_{wind}}{(U_{z=10}^{wind})^2}}}{th(\xi)} \right), \quad (2.24)$$

where

$$\xi = 0.53 \left( \frac{g Z_w}{(U_{z=10}^{wind})^2} \right)^{3/4}, \quad (2.25)$$

$$\zeta = 0.833 \left( \frac{g Z_w}{(U_{z=10}^{wind})^2} \right)^{3/8}, \quad (2.26)$$

where  $g$  – acceleration of gravity,  $m/s^2$ ;  $F_{wind}$  – length of wind acceleration (m);  $U_{z=10}^{wind}$  – wind speed at a height of 10 m above the surface of the water (m/s). The height of the wave in this calculation is expressed in meters, and the wave period in seconds.

For the calculation, we will use the approximation from (Shore protection..., 1984):

$$L_{wave} \approx \frac{g \cdot T_{wave}^2}{2\pi} \sqrt{th \left( \left( \frac{2\pi}{T_{wave}} \right)^2 \frac{Z_w}{g} \right)}. \quad (2.27)$$

It was shown that the maximum error of approximation (2.27) can reach 5 % (Shore protection..., 1984). The maximum error in the computations  $L_{wave}$  takes place when the ratio  $(2\pi Z_w)/L_{wave}$  is about 1.0.

The expression for calculating the coefficient of wave friction for an uneven (rough) bottom can be written in a general form (Stanev et al., 2009):

$$f_{wave}^{rough\_bed} = \alpha'_w \left( \frac{A_{wave}}{k_s} \right)^{-\beta'_w}, \quad (2.28)$$

where  $\alpha'_w$  and  $\beta'_w$  are empirical coefficients;  $A_{wave}$  is wave amplitude (m);  $k_s$  is characteristic roughness scale (m), ( $k_s = 2.5D_{50}$ ). Thus, the ratio  $A_{wave}/k_s$  determines the relative roughness of the bottom. In the calculations, as the first approximation, the following values of the empirical coefficients  $\alpha'_w$  and  $\beta'_w$  can be used (Stanev et al., 2009):  $\alpha'_w = 0.237$  and  $\beta'_w = 0.52$ . However, for specific conditions of a particular water body at the stage of parametric adjustment of the model, the values of these coefficients will need to be clarified.

Taking into account relation (2.22), the amplitude of the wind wave for the "shallow water" conditions is calculated from the following equation:

$$A_{wave} = \frac{H_{wave}}{2sh\left(\frac{2\pi Z_w}{L_{wave}}\right)}. \quad (2.29)$$

The values of height and wavelength are calculated from equations (2.23) and (2.27).

In the modeling practice, other ratios are used to calculate the coefficient of wave friction for an uneven (rough) bottom. They can be written in a general form:

$$f_{wave}^{rough\_bed} = exp\left(\alpha_w'' \left(\frac{A_{wave}}{k_s}\right)^{-\beta_w''} - \gamma_w''\right), \quad (2.30)$$

where  $\alpha_w''$ ,  $\beta_w''$ ,  $\gamma_w''$  are empirical coefficients. For example, when calculating the values  $f_{wave}^{rough\_bed}$ , the following values ( $\alpha_w'' = 5.5$ ,  $\beta_w'' = 0.2$ ,  $\gamma_w'' = 6.3$ ) were obtained for the Baltic Sea conditions (Jönsson, 2005) and ( $\alpha_w'' = 5.213$ ,  $\beta_w'' = 0.194$ ,  $\gamma_w'' = 5.977$ ) for the CAEDYM model (Hipsey et al., 2006).

Since there are no universal computational dependencies for computation of  $f_{wave}^{rough\_bed}$ , the use of equations (2.28) and (2.30) should be provided for the model.

If the bottom is smooth, then in this case  $A_{wave}/k_s \rightarrow \infty$ , and the value of the coefficient of wave friction  $f_{wave}$  will depend only on the regimes of water flow (laminar, turbulent or intermediate). In some cases, the intermediate regime is not considered (Stanev et al., 2009).

The expression for calculating the coefficient of wave friction for a smooth bottom can be written in the general form:

$$f_{wave}^{smooth\_bed} = M_w (Re_w)^{-N_w}, \quad (2.31)$$

where  $M_w$  and  $N_w$  are empirical coefficients;  $Re_w$  – the Reynolds number for the wave motion of water, it is calculated from equation

$$Re_w = \frac{U_{wave}^{max} A_{wave}}{\nu_w(T_w, S)}, \quad (2.32)$$

where  $\nu_w(T_w, S)$  – coefficient of kinematic viscosity of water,  $m^2/sec$ , depending on it  $T_w$  and  $S_w$ .

In a number of studies for the Baltic Sea, the calculation of the values  $f_{wave}^{smooth\_bed}$  for a smooth bottom was carried out for the corresponding flow regime (Jönsson, 2005; Nielsen, 1992):

— if  $Re_w \leq 3.0 \times 10^5$  (laminar flow regime), then  $M_w = 2.0$ ,  $N_w = 0.5$  and then

$$f_{wave}^{smooth\_bed} = 2.0 / \sqrt{Re_w}; \quad (2.33)$$



— if  $3.0 \times 10^5 < Re_w < 1.0 \times 10^6$  (intermediate flow regime), then a linear approximation of the dependence of the coefficient  $f_{wave}^{smooth\_bed}$  on the number  $Re_w$  was used:

$$f_{wave}^{smooth\_bed} = 3.34 \cdot 10^{-3} + 1.05 \cdot 10^{-9} Re_w; \quad (2.34)$$

— if  $Re_w \geq 1.0 \times 10^6$  (turbulent flow regime), then  $M_w = 0.024$ ,  $N_w = 0.123$ , and

$$\text{then } f_{wave}^{smooth\_bed} = 0.024 Re_w^{-0.123}. \quad (2.35)$$

Since there are no universal dependencies for computation of values  $f_{wave}^{smooth\_bed}$  (as for  $f_{wave}^{rough\_bed}$ ), in the SM-model and its software implementation it is necessary to envisage the use of different methods for estimating the values of  $f_{wave}^{smooth\_bed}$  and their possible refinement at the stage of parametric adjustment of the model.

The value of the coefficient of kinematic viscosity  $\nu_w(T_w, S)$ , in  $m^2/s$ , in formula (2.32) is calculated as a function of  $\nu_w(T_w, S)$  and  $S_w$  through the dynamic viscosity  $\mu_w(T_w, S)$

$$\nu_w(T_w, S) = \frac{\mu_w(T_w, S)}{\rho_w(T_w, S)}. \quad (2.36)$$

The changes  $S_w$  and pressures, unlike  $T_w$ , have a negligible effect on the changes in the values  $\mu_w(T_w, S)$  (Neumann, Pierson, 1966), and instead of  $\mu_w(T_w, S)$  in the formula (2.36), one can use the value  $\mu_w(T_w, 0)$  without significant loss of accuracy. Thus, the calculation of  $\nu_w(T_w, S)$  is carried out according to the following formula:

$$\nu_w(T_w, S) = \frac{\mu_w(T_w, 0)}{\rho_w(T_w, S)}. \quad (2.37)$$

To calculate the density of water, the formula (2.15) is used. Values of dynamic viscosity, in  $kg/(m \times sec)$ , are calculated depending on the absolute value  $T_w$  ( $T_{wa}$ ),

$T_{wa} = T_w + 273.15$  according to (Reid et al., 1987):

$$\mu_w(T_w, 0) = 10^{-3} \exp(-24.71 + 4.209 \cdot 10^3 T_{wa}^{-1} + 4.527 \cdot 10^{-2} T_{wa} - 3.376 \cdot 10^{-5} T_{wa}^2). \quad (2.38)$$

To estimate the coefficient of horizontal turbulent exchange  $K_T$  and the horizontal turbulent diffusion coefficient  $(A_n)_n$  for the size fraction  $n$ , we used the well-known Smagorinsky parametrization (Ryzhin, 1986; Klevanny, Smirnova, 2009; Matishov et al., 2009; Klevanny et al., 2001; Smagorinsky, 1963):

$$(K_T; (A_n)_n) = \alpha ((\Delta s)_x (\Delta s)_y) \sqrt{2 \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2}, \quad (2.39)$$

where  $(\Delta s)_x$ ,  $(\Delta s)_y$  – are the grid steps for the spatial coordinates  $OX$  and  $OY$ , respectively; coefficient  $\alpha = 0.25–1.0$  in the calculation of  $K_T$  values and  $\alpha = 0.1–0.3$  in the calculation of  $(A_{\eta})_n$  values. To calculate the values of the spatial derivatives  $\partial U/\partial x$ ,  $\partial U/\partial y$ ,  $\partial V/\partial x$ ,  $\partial V/\partial y$ , the central difference approximation was applied.

As follows from formulas (2.10) and (2.11), the SM sedimentation and the stirring up of the bottom sediment will only develop if the tangential stress at the bottom of the water body  $\tau_{bottom}$  is either less  $\tau_{C_n}^{crit\_sed}$  or greater  $\tau_{C_n}^{crit\_resusp}$ , respectively. Critical values of  $\tau_{C_n}^{crit\_sed}$  and  $\tau_{C_n}^{crit\_resusp}$  vary within fairly wide limits and should be selected according to the calibration results of the models used to study sediment transport processes in lakes, coastal zones of the seas and sea bays. Existing studies and modeling experience show that the values of  $\tau_{C_n}^{crit\_sed}$  vary in the range 0.0–0.18 N/m<sup>2</sup> (N is a force in Newton) and the values of  $\tau_{C_n}^{crit\_resusp}$  are 0.009–0.25 N/m<sup>2</sup> (Chao et al., 2008; Hamilton, Mitchell, 1996; Lou et al., 2000; Mehta, Partheniades, 1975; Ziegler, Nisbet, 1995).

We estimate the value of  $\tau_{bottom}^{curr}$  approximately from (2.17). In dredging areas, the depth is usually 10–30 m, so the contribution of this particular term in the equation (2.12) in the calculation  $\tau_{bottom}$  will be decisive. Since the average height  $Z_0$  of the roughness protrusions of the bottom is  $3.5 \times 10^{-5}$  m, the average depth in the work area is 20 m, the water density is 1000 kg/m<sup>3</sup> and the flow velocity is 0.1 m/sec, we obtain the value of the resistance coefficient  $C_D$  :

$$C_D = 0.16 \left( 1 + \ln \left( \frac{Z_0}{Z_w} \right) \right)^{-2} = 0.16 \left( 1 + \ln \left( \frac{3.5 \cdot 10^{-5}}{20.0} \right) \right)^{-2} = 0.0071,$$

and the value of the tangential stress at the bottom, caused by the movement of water –

$$\tau_{bottom}^{curr} = \rho_w C_D (U^{curr})^2 = 0.0071 \cdot 10^3 \cdot (0.1)^2 \approx 0.071 \text{ N/m}^2.$$

To assess the impact of dredging on the state of the environment, as well as the role of SM in biogeochemical processes in aquatic ecosystems, it is sometimes important to take into account the flocculation effect (Lisitsyn, 1994; Mikkelsen, Pejrup, 2000; Hill, 1998; Smith, Friedrichs, 2011; Winterwerp, 2002). The results of observations show that a fraction of the vertical mass flow of SM can occur to the share of micro- and macroflocules (sometimes up to 50-80 %) (Smith, Friedrichs, 2011). An increase in either size (flocculation) or particle density leads to an increase in the rate of precipitation. As a result, the time of turbidity spot existence decreases and the concentration of SM in water decreases, as well as the distance covered by the turbidity spot under the influence of advective transport.

The settling velocity of particles is determined by the balance of gravitational forces, buoyancy effects and medium resistance. These forces depend both on the properties of the fluid (its density, viscosity) and on the properties of the particles (their density, size, shape, degree of porosity). According to the Stokes law (valid only for small Reynolds numbers  $\left(\left(Re_p\right)_n = \left(\left(W_s\right)_n \cdot D_n\right) / \nu_w, n = \overline{1, N}\right)$  and spherical particles), the settling velocity of particles is determined by the equation:

$$\left(W_s\right)_n = \frac{\left(\left(\rho_s\right)_n - \rho_w\right) g D_n^2}{18 \mu_w}, n = \overline{1, N}, \quad (2.40)$$

where  $D_n$  is the characteristic particle diameter for the  $n$ -th fraction;  $g$  – acceleration of gravity;  $\left(\rho_s\right)_n$  – density of particles of suspension for the  $n$ -th fraction;  $\rho_w$  – density of water;  $\mu_w$  – dynamic viscosity of water. In many studies it was noted that for large particles that have a high deposition rate, application of formula (2.40) is illegal (Raudkivi, 1998; Schlichting, Gersten, 2000; Soulsby, 1997; Ten Brinke, 1994; Winterwerp, 1998; 2002). Therefore, a modification of the Stokes formula is required in order that it can be used not only for small but also for large Reynolds numbers.

In natural waters, two main groups of floccula are distinguished according to their characteristic sizes: micro- and macroflocules (Eisma, 1986). Microflocules have sizes up to 125 microns, and macroflocules are larger aggregates with maximum flocculus sizes up to 3–4 mm. Microflocules usually consist of mineral particles, as well as organic substances of different nature and chemical composition. Macroflocules are formed by aggregation of microflocules in an aqueous environment.

The process of flocculation is a complex physicochemical process, depending on a variety of factors (Lisitsyn, 1994; Winterwerp, 1998, 2002). For natural waters, the impact of turbulent exchange is of primary importance, which in a certain range of its intensity leads to an increase in the frequency of collisions of particles, as a result of which the rate of formation of floccules also increases. However, with considerable turbulence, the reverse process (the destruction of floccules) is often observed. In highly eutrophic (highly productive) waters, the rate of flocculation can be affected by biological factors, in particular, metabolic excretions of organisms (as example, mucus formation) that envelop particles of SM and glue them into larger particles (Ayukai, Wolanski, 1997; Eisma, 1986; Fugate, Friedrichs, 2003; Van der Lee, 2000). Thus, it can be concluded that, other things being equal to physical conditions and sufficiently long intervals of time, with increasing biological activity of natural waters, the rate of flocculation can also increase and, as a consequence, the particle deposition rate will be higher (Smith, Friedrichs, 2011).

In most studies on the influence of turbulent exchange on the settling velocity of SM, ratios have been obtained that contain a large number of empirical coefficients, the

values of which, as a rule, are unknown. Therefore, such calculated dependencies are of little use for practical use. It is necessary to apply low-parameter relations and models that allow experimental verification.

Let us introduce the turbulence energy dissipation parameter  $G$  (Winterwerp, 1998, 2002):

$$G = \sqrt{\varepsilon/\nu_w} = \nu_w/\lambda_0^2, \quad (2.41)$$

where  $\lambda_0$  is the Kolmogorov scale for turbulence;  $\varepsilon$  – the average dissipation rate of turbulent kinetic energy per the unit of mass. Typical values  $\lambda_0$  for estuary zones are  $10^2$ – $10^3$  microns (depending on the depth and speed of water flow). For the calculation  $G$ , the following formula is applied (Manning, 2004):

$$G = \sqrt{u_*^3/(k_w \nu_w z)}, \quad (2.42)$$

in which  $u_*$  is the dynamic speed due to both the flow of water and wave motion;  $k_w$  – the von Karman' constant;  $z$  – is the distance from the bottom.

An empirical dependence was obtained in (Van Leussen, 1994), which makes it possible to calculate the sedimentation rate of suspended particles from the turbulent exchange characteristic, in terms of the turbulent energy dissipation parameter  $G$ :

$$(W_s)_n = (W_{s,0})_n \frac{1 + aG}{1 + bG^2}, n = \overline{1, N}, \quad (2.43)$$

where  $(W_s)_n$  is the actual sedimentation rate of particles of each size fraction of SM in the presence of turbulence;  $(W_{s,0})_n$  – settling rate at a value  $G = 0$ ;  $a$ ,  $b$  – are empirical constants. The settling rate  $(W_{s,0})_n$  – is an important parameter in calculating the concentration of SM in water. The value of  $(W_{s,0})_n$  can be calculated from the equation (Amoundry, 2008):

$$(W_{s,0})_n = \sqrt{\frac{4((\rho_s)_n/\rho_w - 1)gD_n}{3(C_D^s)_n}}, n = \overline{1, N}, \quad (2.44)$$

where  $(C_D^s)_n$  is the coefficient of resistance for spherical particles for each size fraction of SM, depending on the Reynolds number  $(Re_p)_n$ . In a number of cases, the approximate average sedimentation rate of SM  $(W_{s,0})_n$  is calculated in a simplified manner, using only data on the granulometric composition of the transported sediments (Methodical guidelines..., 2003).

There are two most common approximations that are used in calculating the drag coefficient  $(C_D^s)_n, n = \overline{1, N}$  for particles of spherical shape (Graf, 1971, Raudkivi, 1998):

$$(C_D^s)_n = \frac{24}{(Re_p)_n} \left(1 + 0.15(Re_p)_n^{0.687}\right), \quad (2.45)$$

$$(C_D^s)_n = \frac{24}{(Re_p)_n} \left( 1 + \frac{3}{16} (Re_p)_n \right). \quad (2.46)$$

The relation (2.45) is applicable for  $(Re_p)_n < 800$ , and the relation (2.46) is for  $(Re_p)_n \leq 2.0$ .

There is another empirical dependence for calculating  $(W_{s,0})_n$  (Soulsby, 1997):

$$(W_{s,0})_n = \frac{v_w}{D_n} \left( \sqrt{10.36^2 + 1.049(D_*)^3} - 10.36 \right), n = \overline{1, N}, \quad (2.47)$$

where  $(D_*)_n = \sqrt[3]{g(\rho_s)_n / ((\rho_w - 1)v_w^2)} D_n$ . The formula (2.47) was obtained in (Soulsby, 1997) on the basis of experiments on precipitation of sand particles. It does not take into account the influence of form and permeability of particles (degree of its porosity) on the deposition rate. It is established that its application consistent with the data of field measurements for a wide range of Reynolds number values  $(Re_p)_n$ . At small values of  $(Re_p)_n$  the equation (2.47) becomes Stokes' formula (2.40), and for more high values  $(Re_p)_n$  it becomes close to the approximation (2.44) at the condition that the resistance coefficient is calculated from the ratio (2.45).

In flocculation models, floccules are usually considered as self-similar fractal (or fractional-dimensional) particles (Kranenburg, 1994). To obtain the corresponding computational equations, fractal theory is used (Amoury, 2008; Kranenburg, 1994; Winterwerp, 1998, 2002). It is assumed that the settling velocity of particles is a function of the characteristic size of the floccules (their projective diameter  $D$ ) and the density differential  $\Delta\rho_f$  (or the excess density of the floccula with respect to the water density). Usually in the calculations for simplicity it is assumed that  $D = D_{50}$ , and typical values of  $\Delta\rho_f$  due to the flocculation effect vary within 50–300 kg/m<sup>3</sup> (Winterwerp, 1998).

The distribution of aggregated particles by size can be described by a distribution function – just as they do when specifying the initial granulometric composition of SM. In this model, to simplify the problem, the distribution of floccules throughout the possible size spectrum will not be taken into account, and the so-called equilibrium flocculum size  $D_e$ , which is essentially close to the average (median) particle size ( $D_{50}$ ) of the SM (depends on the percentage contribution of particles of different type/size). The formation of aggregated particles with a characteristic size  $D_e$  depends on the current balance of many forces and environmental factors that determine flocculation and the establishment of a certain dynamic equilibrium between the processes of formation and destruction of floccules.



It was shown in (Kranenburg, 1994) that  $\Delta\rho_f$  is possible to relate to the initial characteristic diameter of suspended particles before the beginning of the flocculation process, as well as to the fractal dimension of the particles, by the following equation:

$$\Delta\rho_f = \rho_f - \rho_w \sim (\rho_s - \rho_w) \left( \frac{D_p}{D} \right)^{3-n_f}, \quad (2.48)$$

where  $\rho_f$  is the density of the floccules;  $\rho_w$  is density of water;  $\rho_s$  is the characteristic density of the suspension, which depends on its granulometric composition and physical characteristics. The fractal dimension  $n_f$  of the floccules varies from 1.4 to 2.2 (Winterwerp, 1998). For spherical dense particles  $n_f = 3$ .

The expression for the calculation of the settling velocity of floccules  $(W_s)_f$  can be obtained from the balance equation for the gravitational sedimentation of slurry and the drag force  $F_d$ :

$$F_g = \alpha_f \frac{\pi}{6} D^3 \Delta\rho_f g, \quad (2.49)$$

$$F_d = \beta_f (C_D^s)_f \frac{1}{2} \rho_w \frac{\pi}{4} D^2 (W_s)_f^2, \quad (2.50)$$

where  $\alpha_f$ ,  $\beta_f$  are empirical coefficients (their values depend on the degree of particle sphericity);  $(C_D^s)_f$  is resistance coefficient for settling floccules. In further calculations, for the approximation of  $(C_D^s)_f$  in the calculations, the equation (2.45) will be used.

To calculate the settling rate of floccules  $(W_s)_f$  from (2.48)–(2.50), we obtain (Winterwerp, 1998):

$$(W_s)_f = \frac{\alpha_f}{18\beta_f} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu_w} D_p^{3-n_f} \frac{D^{n_f-1}}{1 + 0.15(Re)_f^{0.687}}. \quad (2.51)$$

For dense particles of spherical shape  $\alpha_f = \beta_f = 1$  and  $n_f = 3$ . If then  $(Re)_f \ll 1$ , then equation (2.51) describes the settling of suspended particles in accordance with the Stokes law (2.40). For particles-floccul  $> 100 \mu\text{m}$ , it can be assumed that  $n_f = 2$  (Winterwerp, 1998). Then it follows from equation (2.51) that  $(W_s)_f \sim D$ .

The use of equation (2.51) is complicated by the fact that for calculations it is necessary to know the characteristic size of floccules  $D$ . Thus, an additional problem arises: the construction of a model that describes the process of formation and destruction of floccules in a turbulent flow of a liquid and allows one to calculate the rate of change in the size of floccules at different intensities of turbulent exchange in water.

In (Levich, 1962), by integrating the diffusion equation within a finite volume much larger  $\lambda_0^3$ , an expression for the velocity process of particle flocculation in a turbulent flow characterized by the turbulent energy dissipation parameter  $G$ :

$$\frac{dn_f}{dt} = -1.5e_f\pi e_d G D^3 n_{sf}^2, \quad (2.52)$$

where  $n_{sf}$  is the number of particles (floculum) per unit volume of fluid;  $t$  – time;  $e_f$  – flocculation efficiency parameter (takes into account that not all collisions of particles will result in the formation of floccules);  $e_d$  – the parameter of the efficiency of the diffusion process. The parameter  $e_f$  is a function of the physico-chemical properties of SM and water, as well as the properties of organic compounds that are contained in the SM. Equation (2.52) is used in most studies of the flocculation process presented in the literature.

The relationship between bulk  $\phi_f$  and mass  $c_f$  concentrations, as well as between  $\phi_f$  and the number of aggregated particles  $n_{sf}$  per unit volume, is reflected by the equation (Winterwerp, 1998).

$$\phi_f = \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_f - \rho_w} \right) \frac{c_f}{\rho_s} = \theta_f n_f D^3, \quad (2.53)$$

where  $\theta_f$  is the particle shape factor. For spherical particles  $\theta_f = \pi/6$ .

The rate of formation and growth of floccules can be estimated from equations (2.48) and (2.53). If we assume that for a certain period of time  $\Delta t$  the initial number of particles  $n_{sf}$  per unit volume of water and mass concentration  $c_f$  are constant values, then we can estimate the value  $dn_{sf}/dD$ :

$$\frac{dn_{sf}}{dD} = -\frac{c_f n_{sf}}{\rho_s \theta_f} D^{n_f-3} D^{-n_f-1}. \quad (2.54)$$

From (2.53) and (2.54) we obtain that

$$\frac{dn_{sf}}{dt} = \frac{dn_{sf}}{dD} \frac{dD}{dt} = -\frac{c_f n_{sf}}{\rho_s \theta_f} D^{n_f-3} D^{-n_f-1} \frac{dD}{dt}. \quad (2.55)$$

Then from (2.52) and (2.55) we find that the rate of formation and growth of the size of floccules at different intensities of turbulent exchange in water can be determined by solving a first-order differential equation:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{3 e_f \pi e_d c_f}{2 \theta_f n_{sf} \rho_s} G D^{n_f-3} D^{4-n_f} = k_A c_f G D^{4-n_f}, \quad (2.56)$$

where  $k_A = \frac{3 e_f \pi e_d}{2 \theta_f n_{sf} \rho_s} \frac{1}{D_p^{n_f-3}} = k'_A \frac{D_p^{n_f-3}}{n_{sf} \rho_s}$ ; and  $k'_A = \frac{3 e_f \pi e_d}{2 \theta_f}$  is an empirical parameter.

The rate of destruction of floccula, depending on the intensity of turbulent exchange, is described by the following differential equation (Winterwerp, 1998):

$$\frac{dD}{dt} = -k_B G^{q_f+1} (D - D_p)^{p_f} D^{2q_f+1}. \quad (2.57)$$

In (2.57), the values of the empirical parameters  $p_f$ ,  $q_f$  and  $k_B$  can be derived from field and/or experimental observations. Thus, equations (2.56) and (2.57) describe the process of formation and destruction of floccules in a turbulent flow of a liquid and allow one to calculate the rate of change of their size for different intensity of turbulent exchange in water. General view of the corresponding flocculation model (Winterwerp, 1998):

$$\frac{dD}{dt} = k_A c_f G D^{4-n_f} - k_B G^{q_f+1} (D - D_p)^{p_f} D^{2q_f+1}. \quad (2.58)$$

To simplify the calculations using equation (2.58) and in accordance with the results from (Winterwerp, 1998), we assume that the average fractal dimension  $n_f = 2$ . In this case  $p_f = 1$ . In a state close to the dynamic equilibrium,  $q_f = 0.5$  (Winterwerp, 1998). On the basis of these simplifying assumptions, from (2.58) we obtain that

$$\frac{dD}{dt} = k_A c_f G D^2 - k_B G^{3/2} (D - D_p) D^2. \quad (2.59)$$

As shown by the estimates obtained from field observations and laboratory experiments, the values are  $k_A \approx 14.6 \text{ m}^2/\text{kg}$ , and  $k_B \approx 14.0 \cdot 10^3 \text{ c}^{1/2}/\text{m}^2$ .

It follows from (2.59) that for small values  $D$  the formation of floccules will dominate, and for sufficiently large  $D$  – the reverse process of their destruction will dominate. It should also be borne in mind that the direction of a process depends on the current intensity of turbulent exchange. Equation (2.59) can be easily solved analytically on the assumption that for some time interval (usually this is a step in time) the value of mass concentration  $c_f$  is a constant value.

If the processes of formation and destruction of floccules are in a state of dynamic equilibrium, then  $dD/dt = 0$  and one can obtain an expression for estimating the equilibrium size of floccules  $D_e$ :

$$D_e = D_p + \frac{k_A c_f}{k_B \sqrt{G}}. \quad (2.60)$$

Then from (2.51) with the aid of (2.60) we obtain the relation for calculating the equilibrium deposition rate of floccules:

$$(W_s)_{f,e} = \frac{\alpha_f (\rho_s - \rho_w) g}{18\beta_f \mu_w} D_p^{3-n_f} \frac{\left( D_p + \frac{k_A c_f}{k_B \sqrt{G}} \right)^{n_f - 1}}{1 + 0.15(Re)_f^{0.687}} \quad (2.61)$$

Assuming that the mean fractal dimension  $n_f = 2$ , from (2.61) we find that

$$(W_s)_{f,e} = \frac{\alpha_f (\rho_s - \rho_w) g}{18\beta_f \mu_w} D_p \frac{\left( D_p + \frac{k_A c_f}{k_B \sqrt{G}} \right)}{1 + 0.15(Re)_f^{0.687}}. \quad (2.62)$$

Equation (2.62) makes it possible to calculate the equilibrium rate of floccules deposition depending on a number of properties of water and SM: the initial characteristic diameter  $D_p$  of suspended particles before the flocculation process begins; intensity of turbulent exchange in water; characteristic suspension density  $\rho_s$  (depends on its granulometric composition and physical characteristics); the density differential  $\Delta\rho = \rho_s - \rho_w$ ; dynamic viscosity of water  $\mu_w$ ; Reynolds number.

Thus, if the flocculation effect is not considered in modeling the propagation of SM, then formulas (2.43) and (2.44) should be used for calculating the rate of their deposition for each size fraction of SM. The question of whether or not to include in the calculations the effect of flocculation of SM should be addressed separately on the basis of additional field and/or laboratory studies of the physico-chemical properties of bottom sediments. In particular, with their help it is necessary to determine which fractions of the initial composition of SM can potentially be subjected to the process of flocculation. Then, in the simulation for this part of SM, the rate of deposition of floccules will be calculated using formula (2.62), and for each of the remaining size fractions – according to formulas (2.43) and (2.44).

### Conclusions

A mathematical model is developed for studying in the natural conditions the processes of propagation of SM in marine coastal areas and ecosystems of sea bays, lagoons and estuaries of rivers. It can also be used to quantify the formation of spots of additional turbidity of water in dredging and any other works in which some external mechanical effect on bottom sediment is expected. In this case, zones of additional turbidity of water are formed as a result of the formation of SM at the sites of such operations and the subsequent spread of SM along the water area in this and adjacent areas. The developed model calculates various indicators that quantify certain structural and functional features of the state of aquatic ecosystems and their spatial and temporal dynamics, and also reflect the degree of disturbance of the natural state of the marine

environment as the habitat of aquatic biological resources. Such data should be provided to different monitoring bodies when passing the expertise for the AEEP.

Depending on the task being performed, this model will use additional blocks: a biogeochemical block of the simulation model of the aquatic ecosystem (for example, as in (Leonov, 2008; Podgornyi, Leonov, 2013a,b) will be required to study the processes of biochemical transformation of SM and DOM. For a simpler task of describing the formation of zones of additional turbidity of water during dredging, it is sufficient to use the model block, the propagation of a conservative SM in water. At the same time, a specific technological scheme of dredging and other works should be taken into account. As a rule, SM is represented by organic and mineral fractions in the aqueous medium, therefore it is necessary to take into account all the most important sources of their intake and correctly mathematically formalize the intraspecific processes of substance transformation (take into account the possible external load on the aquatic environment, wind and hydrodynamic effects on bottom sediment, precipitation processes, and resuspension of bottom sediment, and also flocculation processes). In each case, the significance of the processes is individual and it can be estimated when forming the structure of additional model blocks and based on the results of model calculations.

The proposed numerical model considers the modified system of Saint-Venant's equations (the theory of shallow water) for the description of hydrodynamics and circulation of water streams with given boundary conditions – nonflow (or zero normal component of the average velocity over the depth) on the solid contour, radiation on the liquid boundary and energy in the river sections. As the initial ones, the state of rest (zero values of velocities and level) was used. For the numerical solution of the modified Saint-Venant system of equations, an implicit difference scheme using alternating directions is used.

At the second stage, the equations of advection and turbulent diffusion are considered in modeling the processes of formation and propagation of SM in the coastal region under consideration. Boundary and initial conditions are formulated depending on the features of the water body, the tasks assigned and the availability of observational data. The scheme of numerical integration of the initial system of equations of advection and turbulent diffusion is based on the method of splitting by physical processes and spatial coordinates (includes 4 stages – with successive solution of advection equations, gravitational deposition of SM, turbulent exchange of SM and local processes of sedimentation of SM, from point and other sources).

Examples of formalization of empirical functions that determine the influence of important factors depending on environmental conditions and the dominance of individual processes associated with the redistribution of SM between the water



environment and bottom sediment are given. A number of parameters can be used to calculate the use of different empirical formulas.

To estimate the coefficients of horizontal turbulent exchange and turbulent diffusion, the Smagorinsky parametrization (where one parameter is tuned) is used. In the calculation of spatial derivatives, the central-difference approximation is applied. To calculate the characteristics of turbulence (for example, the kinetic energy of turbulence and the rate of its dissipation) it is required to solve the corresponding nonlinear system of differential equations. The problem of comparing different models of turbulent exchange and the results of modeling with each other and with the data of field observations remains urgent, and additional studies are required for this.

To assess the impact of dredging on the state of the environment and the role of SM in biogeochemical processes in aquatic ecosystems of marine coastal areas, in zones of mixing sea and fresh water, flocculation should be taken into account in a number of cases. It is associated with the coalescence of particles of SM and, as a consequence, its rapid precipitation. A relationship is obtained for calculating the sedimentation rate of each size fraction of SM, as well as the equilibrium deposition rate of flocs depending on the properties of water, suspension, and intensity of turbulent exchange. With the obtained relations and the developed mathematical model, comprehensive study is possible with quantitative calculation of the transformation rates and spatio-temporal dynamics of SM in highly productive aquatic ecosystems and also in river-sea interaction zones on the so-called "marginal filters" sections.

#### Acknowledgments

The authors are grateful to prof. G. I. Barenblatt (Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences) for a careful reading of the article and valuable comments that were taken into account, if possible.

#### References

- Afanasyev S.V., Ryzhin S.V., Numerical simulation of horizontal turbulent diffusion in a shallow lake, *Vod. Resources*, 1986, Vol. 13, No. 1, pp. 87–94.
- Amoury L., A review on coastal sediment transport modeling, Proudman Oceanographic Laboratory, Internal document No. 189, 2008, 44 p.
- Arkhipov B.V., Koterov V.N., Kocherova A.S., Solbakov V.V., Khublaryan G.M., Calculating sediment transport in the coastal zone of the sea, *Water Resources*, 2004, Vol. 31, No. 1, pp. 27–34.
- Ayukai T., Wolanski E., Importance of biologically mediated removal of fine sediments from the Fly River plume, Papua New Guinea, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 1997, Vol. 44, pp. 629–639.
- Baklanovskaya V.F., Pal'tsev B.V., Chechel I.I., On boundary-value problems for the system of Saint-Venant equations in the plane, *Zh. Calculated. Math. and Math. Fiz.*, 1979, Vol. 19, No. 3, pp. 708–725, [In Russian].
- Cebeci T., Turbulence models and their application: Effective numerical methods with computer programs. Long Beach, California, Horizons Publishing Inc., 2004, 118 p.

- Chao X., Jia Y., Shields Jr.F.D., Wang S.S.Y., Cooper C.M., Three-dimensional numerical modeling of cohesive sediment transport and wind wave impact in a shallow oxbow lake, *Advances in Water Resources*, 2008, Vol. 31, No. 7, pp. 1004-1014.
- Chubarenko I., Tchepikova I., Modeling of man-made contribution to salinity increase into the Vistula Lagoon (Baltic Sea), *Ecol. Modeling*, 2001, Vol. 138, pp. 87-100.
- Davies, A.M., Lawrence J., Examining the influence of wind and wind wave turbulence on tidal currents, using a three-dimensional hydrodynamic model including wave-current interaction, *J. Phys. Oceanogr.*, 1994, Vol. 24, pp. 2441-2460.
- Einstein H.A., Krone R.B., Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water, *J. Geophys. Res.*, 1962, Vol. 67, pp. 1451-146.
- Eisma D., Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries, *Neth. J. Sea Res.*, 1986, Vol. 20 (2/3), pp. 183-199.
- Fahmy O., Fassieh K.M., Zaki M.A., A numerical model of the wave-induced currents in the turbulent coastal zone, *ISRN Civil Engineering*, 2013, Vol. 2013, Article ID 904180, pp. 1-7. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/904180>.
- Fugate D., Friedrichs C.T., Controls on suspended aggregate size in partially mixed estuaries, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 2003, Vol. 58, pp. 389-404.
- Glenn S.M., Grant W.D., A suspended sediment stratification correction for combined waves and current flows, *J. Geophys. Res.*, 1987, Vol. 92, (C8), pp. 8244-8264.
- Graf W.H., *Hydraulics of sediment transport*, New York, McGraw-Hill, 1971, 513 p.
- Grant W.D., Madsen O.S., Combined wave and current interaction with a rough bottom, *J. Geophys. Res.*, 1979, Vol. 84 (C4), pp. 1797-1808.
- Hamilton D.P., Mitchell S.F., An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes, *Hydrobiologia*, 1996, Vol. 317, pp. 209-220.
- Hipsey M.R., Romero J.R., Antenucci J.P., Hamilton D., Computational aquatic ecosystem dynamics model: CAEDYM, v.2.3, Science manual, University of Western Australia: Centre for water research, 2006, 102 p.
- Jönsson A., Model studies of surface waves and sediment resuspension in the Baltic sea, Linköping, Sweden: Linköping University, 2005, 55 p.
- Jonsson I.G., Wave boundary layers and friction factors, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International conference on coastal engineering, Tokyo, Japan, ASCE, 1966, pp. 127-148.
- Kester D. R., Comparison of recent seawater freezing point data, *J. Geophys. Res.*, 1974, Vol. 79, pp. 4555-4556.
- Klevanny K.A., Gubareva V.P., Mostamandy M.S.W., Ozerova L.B., Water level forecasts for the Eastern Gulf of Finland, *Bull. of the Maritime Institute*, Gdansk, 2001, Vol. 28, No. 2, pp. 71-87.
- Klevanny K.A., Smirnova E.V., Use of the CARDINAL software for solving hydraulic problems, Zhurn, University of Water Communications, 2009, Issue 1, pp. 153-162, [In Russian].
- Kranenburg C., The fractal structure of cohesive sediment aggregates, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 1994, Vol. 39, pp. 451-460.
- Lai Y.G., Two-dimensional depth-averaged flow modelling with an unstructured hybrid mesh, *J. Hydraul. Eng.*, 2010, Vol. 136, pp. 12-23.
- Leonov A.V., Modeling of natural processes on the basis of the imitational hydroecological model of transformation of compounds C, N, P, Si. Yuzhno-Sakhalinsk, Sakh State University, 2008, 168 p., [In Russian].
- Levich V.G., *Physicochemical hydrodynamics*, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1962, 700 p.
- Lisitsyn A.P., Marginal filter of the oceans, *Oceanology*, 1994, Vol. 34, No. 5, pp. 735-747, [In Russian].
- Lisitsyn A.P., Barenblatt G.I., *Hydrodynamics and sedimentation*, Moskva, Nauka, 1983, 232 p., [In Russian].
- Lou J., Schwab D.J., Beletsky D., Hawley N., A model of sediment resuspension and transport dynamics in southern Lake Michigan, *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol. 105, pp. 6591-6610.
- Luetlich R.A., Harleman D.R.F., Somlyody L., Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events, *Limnol. Oceanogr.*,

- 1990, Vol. 35, pp. 1050–1067.
- Maciejewska A., Pempkowiak J., DOC and POC in the water column of the southern Baltic. Part I. Evaluation of factors influencing sources, distribution and concentration dynamics of organic matter, *Oceanologia*, 2014, Vol. 56, pp. 523–548.
- Maciejewska A., Pempkowiak J., DOC and POC in the water column of the southern Baltic. Part II – Evaluation of factors affecting organic matter concentrations using multivariate statistical methods, *Oceanologia*, 2015, Vol. 57, pp. 168–176.
- Manning A.J., The development of new algorithms to parameterize the mass settling flux of flocculated estuarine sediments, Defra Project FD1905. Report TR 145, Rev. 2.0, HR Wallingford, 2004, 48 p.
- Marchuk G.I., Splitting methods, Moscow: Nauka, 1988, 264 p., [In Russian].
- Marchuk G.I., Dymnikov V.P., Zalesny V.B., Mathematical models in geophysical hydrodynamics and numerical methods for their implementation, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 296 p., [In Russian].
- Matishov G.G., Makarevich P.R., Jenyuk S.L., Marine oil and gas development and rational nature management on the shelf, Rostov-on-Don: YNC Publishing House, 2009, 500 p., [In Russian].
- Mehta A.J., Partheniades E., An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment, *J. Hydraul. Res.*, 1975, Vol. 13, pp. 361–381.
- Methodical guidelines for calculating the distribution of turbidity zones during dredging and dumping in the Navy. Moscow: MO RF, 2003, 80 p., [In Russian].
- MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation, Hørsholm, Denmark: DHI, 2012, 50 p.
- Mikkelsen O.A., Pejrup M., In situ particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume, *Mar. Geol.*, 2000, Vol. 170, pp. 443–459.
- Milligan T.G., Hill P.S., A laboratory assessment of the relative importance of turbulence, particle composition, and concentration in limiting maximal floc size and settling behavior, *J. Sea Res.*, 1998, Vol. 39, pp. 227–241.
- Molchanov M., Eremina T.R., Neelov I.A. Modeling of suspended matter transport in the Neva Bay and the Eastern part of the Gulf of Finland, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference (school) on Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas, Baltiysk (Kaliningrad Oblast), 26–30 June 2010 / Ed. by B. Chubarenko, Kaliningrad: Terra Baltica, 2010, pp. 207–211.
- Neumann G., Pierson W.J., Principles of Physical Oceanography. Prentice-Hall, Englewood Cliffs., NJ, 1966, 545 p.
- Neumeier U., Ferrarin C., Amos C.L., Umgieser G., Li M.Z., SEDTRANS05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters with a new algorithm for cohesive sediments, *Computers and Geosciences*, 2008, Vol. 34, pp. 1223–1242.
- Nielsen P., Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Advanced series on ocean engineering, 4. Singapore: World Scientific, 1992, 324 p.
- Partheniades E., Erosion and deposition of cohesive soils, *J. Hydraul. Div. ASCE.*, 1965, Vol. 91, (HY1), pp. 105–139.
- Podgornyi K.A., Mathematical modeling of freshwater ecosystems of non-stratified reservoirs (algorithms and numerical methods), Rybinsk: Publishing house of the Rybinsk Printing House, 2003, 328 p., [In Russian].
- Podgornyi K.A., Leonov A.V., The use of a spatially heterogeneous simulation model for studying biotransformation processes of nitrogen and phosphorus compounds and the dynamics of oxygen dissolved in water in the ecosystem of Neva Bay, the Gulf of Finland: 1. Model description, *Water Resources*, 2013a, Vol. 40, No. 2, pp. 170–180.
- Podgornyi K.A., Leonov A.V., The use of a spatially heterogeneous simulation model for studying biotransformation processes of nitrogen and phosphorus compounds and the dynamics of oxygen dissolved in water in the ecosystem of Neva Bay, the Gulf of Finland: 2. Input data for calculations, modeling results, and their analysis, *Water Resources*, 2013b, Vol. 40, No. 3, pp. 254–270.

- Raudkivi A.J., Loose boundary hydraulics, Taylor & Francis, London, 1998, 538 p.
- Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E., The Properties of Gases and Liquids, 4<sup>th</sup>ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987, 741 p.
- Rodi W., Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review, Delft, the Netherland: IAHR Publication, 1980, 116 p.
- Rukhovets L.A., Mathematical modeling of water exchange and distribution of impurities in the Neva Bay, *Meteorol. and hydrology*, 1982, No. 7, pp. 78–87, [In Russian].
- Ryabchenko V.A., Rumyantsev V.A., Konoplev V.N. et al., Evaluation of water quality changes in the Neva Bay after the commissioning of the South-Western treatment facilities of St. Petersburg (according to mathematical modeling), *Izv. Russian Geographical Society*, 2006, Vol. 138, No. 5, pp. 48–57, [In Russian].
- Ryazhin S.V., Terzhevik A.Yu., Afanasyev S.V., Hydrodynamic regime and conditions of accumulation of bottom sediments, Preservation of a natural ecosystem of a reservoir in the urbanized landscape. Leningrad: Nauka, 1984, pp. 83–92, [In Russian].
- Samarskii A.A., Vabishchevich P.N., Additive schemes for problems of mathematical physics. Moscow: Nauka, 1999a, 320 p., [In Russian].
- Samarskii A.A., Vabishchevich P.N., Numerical methods for solving convection-diffusion problems. Moscow: Editorial URSS, 1999b, 248 p., [In Russian].
- Schlichting H., Gersten K., Boundary-layer theory. Springer, Berlin, 2000, 811 p.
- Shore protection manual. U.S. Army engineer waterways experimental station, Coastal engineering research centre, V. I, 4<sup>th</sup> edition, PO Box 631, Vicksburg, Mississippi 39180, 1984, 652 p.
- Signell R.P., Beardsley R.C., Graber H.C., Capotondi A., Effect of wave-current interaction on wind-driven circulation in narrow, shallow embayments, *J. Geophys. Res.*, 1990, Vol. 95, pp. 9671–9678.
- Smagorinsky J., General circulation experiments with the primitive equations. I. Basic experiment, *Monthly Weather Review*, 1963, Vol. 91, pp. 99–164.
- Smith S.J., Friedrichs C.T., Size and settling velocities of cohesive flocs and suspended sediment aggregates in a trailing suction hopper dredge plume, *Cont. Shelf Res.*, 2011, Vol. 31, pp. 550–563.
- Soulsby R.L., Dynamics of marine sands: a manual for practical applications, HR Wallingford, Thomas Telford Publications, 1997, 253 p.
- Stanev E.V., Dobrynin M., Pleskachevsky A., et al., Bed shear stress in the southern North Sea as an important driver for suspended sediment dynamics, *Ocean Dynamics*, 2009, Vol. 59, pp. 183–194.
- Teeter A.M., Johnson B.H., Berger C. et al., Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated area (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons), *Hydrobiologia*, 2001, Vol. 444, pp. 1–23.
- Ten Brinke W.B.M., Settling velocities of mud aggregates in the Oosterschelde tidal basin (The Netherlands), determined by a submersible video system, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 1994, Vol. 39, pp. 549–564.
- Van der Lee W.T.B., Temporal variation of floc size and settling velocity in the Dollard estuary, *Cont. Shelf Res.*, 2000, Vol. 20, pp. 1495–1511.
- Van Leussen W., Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport. PhD Thesis, University of Utrecht., 1994, 488 p.
- Winterwerp J.C., A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment, *J. Hydraul. Res.*, 1998, Vol. 36, pp. 309–326.
- Winterwerp J.C., On the flocculation and settling velocity of estuarine mud, *Cont. Shelf Res.*, 2002, Vol. 22, pp. 1339–1360.
- Ziegler C.K., Nisbet B.S., Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir, *J. Hydraul. Eng.*, 1995, Vol. 121, pp. 773–781.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В МОРСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ:

### 1. ОПИСАНИЕ ВВ-МОДЕЛИ

**К. А. Подгорный<sup>1</sup>, А. В. Леонов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Атлантический НИИ рыбного хозяйства и океанографии,  
236000, г. Калининград, ул. Дм. Донского, д. 5,  
e-mail: [kapborok@mail.ru](mailto:kapborok@mail.ru)*

<sup>2</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [leonov@ocean.ru](mailto:leonov@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 05.09.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Рассмотрена методика разработки математической модели для изучения распределения концентраций взвешенного вещества в прибрежных морских акваториях. Эта модель оценивает последствия дноуглубительных работ (нарушений естественного состояния морской среды для биоресурсов), она воспроизводит образование взвешенного вещества и его последующий перенос в водной среде в мелководных морских заливах и морских прибрежных акваториях. Эта задача решается в два основных этапа: сначала проводится численное интегрирование системы уравнений гидродинамики (уравнений теории «мелкой воды») и определяются значения средних по глубине составляющих скорости течения; и на втором этапе – интегрируется система уравнений турбулентной диффузии, учитываются процессы седиментации взвешенного вещества, взмучивания донных отложений, поступления взвеси из распределенных точечных источников, их перераспределения в водной среде и накопления остаточных количеств на дне.

**Ключевые слова:** уравнения теории мелкой воды; система уравнений адвекции и турбулентной диффузии; начальные и граничные условия

### Литература

- Архипов Б.В., Котеров В.Н., Кочерова А.С., Солбаков В.В., Хубларян Г.М. Расчет распространения взвешенных веществ в прибрежной области моря // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 31–39.
- Афанасьев С.В., Рянжин С.В. Численное моделирование горизонтальной турбулентной диффузии в мелком озере // Вод. ресурсы. 1986. Т. 13. № 1. С. 87–94.
- Баклановская В.Ф., Пальцев Б.В., Чечель И.И. О краевых задачах для системы уравнений Сен-Венана на плоскости // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1979. Т. 19. № 3. С. 708–725.
- Клеванный К.А., Смирнова Е.В. Использование программного комплекса CARDINAL для решения задач гидравлики // Журн. Университета Водных коммуникаций. 2009. Вып. 1. С. 153–162.
- Леонов А.В. Моделирование природных процессов на основе имитационной гидроэкологической модели трансформации соединений С, N, P, Si. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2008. 168 с.
- Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Лисицын А.П., Баренблатт Г.И. Гидродинамика и осадкообразование. М.: Наука, 1983.



232 с.

Марчук Г.И. Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 264 с.

Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 296 с.

Матишов Г.Г., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л. и др. Морские нефтегазовые разработки и рациональное природопользование на шельфе. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ, 2009. 500 с.

Методические указания по расчету распространения зон мутности при дноуглублении и дампинге на акваториях ВМФ. М.: МО РФ, 2003. 80 с.

Подгорный К.А. Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). Рыбинск: Изд-во ОАО "Рыбинский Дом печати", 2003. 328 с.

Подгорный К.А., Леонов А.В. Использование пространственно-неоднородной имитационной модели для изучения процессов биотрансформации соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода в экосистеме Невской губы Финского залива. 1. Описание модели // Водные ресурсы. 2013а. Т. 40. № 2. С. 179–191.

Подгорный К.А., Леонов А.В. Использование пространственно-неоднородной имитационной модели для изучения процессов биотрансформации соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода в экосистеме Невской губы Финского залива. 2. Входные данные для расчетов, результаты моделирования и их анализ // Водные ресурсы. 2013б. Т. 40. № 3. С. 240–258.

Руховец Л.А. Математическое моделирование водообмена и распространения примесей в Невской губе // Метеорол. и гидрология. 1982. № 7. С. 78–87.

Рябченко В.А., Румянцев В.А., Коноплев В.Н. и др. Оценка изменения качества воды Невской губы после введения в эксплуатацию юго-западных очистных сооружений Санкт-Петербурга (по данным математического моделирования) // Изв. Русского Географического Общества. 2006. Т. 138. Вып. 5. С. 48–57.

Рянжин С.В., Терзевик А.Ю., Афанасьев С.В. и др. Гидродинамический режим и условия накопления донных осадков // Сохранение природной экосистемы водоема в урбанизированном ландшафте. Л.: Наука, 1984. С. 83–92.

Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. М.: Наука, 1999а. 320 с.

Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции–диффузии. М.: Эдиториал УРСС, 1999б. 248 с.

Amoury L.A. review on coastal sediment transport modelling // Proudman Oceanographic Laboratory. Internal document No. 189. 2008. 44 p.

Ayukai T., Wolanski E. Importance of biologically mediated removal of fine sediments from the Fly River plume, Papua New Guinea // Estuarine Coastal Shelf Sci. 1997. Vol. 44. P. 629–639.

Cebeci T. Turbulence models and their application: Efficient numerical methods with computer programs. Long Beach, California: Horizons Publishing Inc., 2004. 118 p.

Chao X., Jia Y., Shields Jr. F.D., et al. Three-dimensional modeling of cohesive sediment transport and wind wave impact in a shallow oxbow lake // Adv. Water Res. 2008. Vol. 31. P. 1004–1014.

Chubarenko I., Tchepikova I. Modelling of man-made contribution to salinity increase into the Vistula Lagoon (Baltic Sea) // Ecol. Modelling. 2001. Vol. 138. P. 87–100.

Davies A.M., Lawrence J. Examining the influence of wind and wind wave turbulence on tidal currents, using a three-dimensional hydrodynamic model including wave-current interaction // J. Phys. Oceanogr. 1994. Vol. 24. P. 2441–2460.

Einstein H.A., Krone R.B. Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water // J. Geophys. Res. 1962. Vol. 67. P. 1451–1461.

- Eisma D.* Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries // *Neth. J. Sea Res.* 1986. Vol. 20 (2/3). P. 183–199.
- Fahmy O., Fassieh K.M., Zaki M.A.* A numerical model of the wave-induced currents in the turbulent coastal zone // *ISRN Civil Engineering.* 2013. Vol. 2013. P. 1–7.
- Fugate D., Friedrichs C.T.* Controls on suspended aggregate size in partially mixed estuaries // *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 2003. Vol. 58. P. 389–404.
- Glenn S.M., Grant W.D.* A suspended sediment stratification correction for combined waves and current flows // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92 (C8). P. 8244–8264.
- Graf W.H.* Hydraulics of sediment transport. New York: McGraw-Hill, 1971. 513 p.
- Grant W.D., Madsen O.S.* Combined wave and current interaction with a rough bottom // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84 (C4). P. 1797–1808.
- Hamilton D.P., Mitchell S.F.* An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes // *Hydrobiologia.* 1996. Vol. 317. P. 209–220.
- Hipsey M.R., Romero J.R., Antenucci J.P., Hamilton D.* Computational aquatic ecosystem dynamics model: CAEDYM, v.2.3, Science manual. University of Western Australia: Centre for water research, 2006. 102 p.
- Jönsson A.* Model studies of surface waves and sediment resuspension in the Baltic sea. Linköping, Sweden: Linköping University, 2005. 55 p.
- Jonsson I.G.* Wave boundary layers and friction factors // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International conference on coastal engineering.* Tokyo, Japan, ASCE, 1966. P. 127–148.
- Kester, D. R.* Comparison of recent seawater freezing point data // *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79. P. 4555–4556.
- Klevanny K.A., Gubareva V.P., Mostamandy M.S.W., Ozerova L.B.* Water level forecasts for the Eastern Gulf of Finland // *Bull. of the Maritime Institute, Gdansk.* 2001. Vol. 28. No. 2. P. 71–87.
- Kranenburg C.* The fractal structure of cohesive sediment aggregates // *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 1994. Vol. 39. P. 451–460.
- Lai Y.G.* Two-dimensional depth-averaged flow modelling with an unstructured hybrid mesh // *J. Hydraul. Eng.* 2010. Vol. 136. P. 12–23.
- Levich V.G.* Physicochemical hydrodynamics. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1962. 700 p.
- Lou J., Schwab D.J., Beletsky D., Hawley N.A.* model of sediment resuspension and transport dynamics in southern Lake Michigan // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 6591–6610.
- Luetlich R.A., Harleman D.R.F., Somlyódy L.* Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events // *Limnol. Oceanogr.* 1990. Vol. 35. P. 1050–1067.
- Manning A.J.* The development of new algorithms to parameterize the mass settling flux of flocculated estuarine sediments. // *Defra Project FD1905. Report TR 145. Rev. 2.0.* HR Wallingford, 2004. 48 p.
- Maciejewska A., Pempkowiak J.* DOC and POC in the water column of the southern Baltic. Part I. Evaluation of factors influencing sources, distribution and concentration dynamics of organic matter // *Oceanologia.* 2014. Vol. 56. P. 523–548.
- Maciejewska A., Pempkowiak J.* DOC and POC in the water column of the southern Baltic. Part II – Evaluation of factors affecting organic matter concentrations using multivariate statistical methods // *Oceanologia.* 2015. Vol. 57. P. 168–176.
- Mehta A.J., Partheniades E.* An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment // *J. Hydraul. Res.* 1975. Vol. 13. P. 361–381.
- MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM.* Hydrodynamic and Transport Module. Scientific Documentation. Hørsholm, Denmark: DHI, 2012. 50 p.
- Mikkelsen O.A., Pejrup M.* In situ particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume // *Mar. Geol.* 2000. Vol. 170. P. 443–459.

- Milligan T.G., Hill P.S.* A laboratory assessment of the relative importance of turbulence, particle composition, and concentration in limiting maximal floc size and settling behavior // *J. Sea Res.* 1998. Vol. 39. P. 227–241.
- Molchanov M., Eremina T.R., Neelov I.A.* Modeling of suspended matter transport in the Neva Bay and the Eastern part of the Gulf of Finland // *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference (school) on Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas.* Baltiysk (Kaliningrad Oblast), 26–30 June 2010 / Ed. by B. Chubarenko. Kaliningrad: Terra Baltica, 2010. P. 207–211.
- Neumann G., Pierson W.J.* *Principles of Physical Oceanography.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1966. 545 p.
- Neumeier U., Ferrarin C., Amos C.L., Umgiesser G., Li M.Z.* SEDTRANS05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters with a new algorithm for cohesive sediments // *Computers and Geosciences.* 2008. Vol. 34. P. 1223–1242.
- Nielsen P.* Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *Advanced series on ocean engineering, 4.* Singapore: World Scientific, 1992. 324 p.
- Partheniades E.* Erosion and deposition of cohesive soils // *J. Hydraul. Div. ASCE.* 1965. Vol. 91 (HY1). P. 105–139.
- Raudkivi A.J.* *Loose boundary hydraulics.* Taylor & Francis, London, 1998. 538 p.
- Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E.* *The Properties of Gases and Liquids.* 4<sup>th</sup>ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987. 741 p.
- Rodi W.* *Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review.* Delft, the Netherland: IAHR Publication, 1980. 116 p.
- Schlichting H., Gersten K.* *Boundary-layer theory.* Springer, Berlin, 2000. 811 p.
- Shore protection manual. U.S. Army engineer waterways experimental station. Coastal engineering research centre. V. I, 4<sup>th</sup> edition. PO Box 631, Vicksburg, Mississippi 39180, 1984. 652 p.
- Signell R.P., Beardsley R.C., Graber H.C., Capotondi A.* Effect of wave-current interaction on wind-driven circulation in narrow, shallow embayments // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. P. 9671–9678.
- Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations. I. Basic experiment // *Monthly Weather Review.* 1963. Vol. 91. P. 99–164.
- Smith S.J., Friedrichs C.T.* Size and settling velocities of cohesive flocs and suspended sediment aggregates in a trailing suction hopper dredge plume // *Cont. Shelf Res.* 2011. Vol. 31. P. 550–563.
- Soulsby R.L.* *Dynamics of marine sands: a manual for practical applications.* HR Wallingford, Thomas Telford Publications, 1997. 253 p.
- Stanev E.V., Dobrynin M., Pleskachevsky A., et al.* Bed shear stress in the southern North Sea as an important driver for suspended sediment dynamics // *Ocean Dynamics.* 2009. Vol. 59. P. 183–194.
- Teeter A.M., Johnson B.H., Berger C. et al.* Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated area (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons) // *Hydrobiologia.* 2001. Vol. 444. P. 1–23.
- Ten Brinke W.B.M.* Settling velocities of mud aggregates in the Oosterschelde tidal basin (The Netherlands), determined by a submersible video system // *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 1994. Vol. 39. P. 549–564.
- Van der Lee W.T.B.* Temporal variation of floc size and settling velocity in the Dollard estuary // *Cont. Shelf Res.* 2000. Vol. 20. P. 1495–1511.
- Van Leussen W.* *Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport.* PhD Thesis, University of Utrecht. 1994. 488 p.
- Winterwerp J.C.* A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment // *J.*

Hydraul. Res. 1998. Vol. 36. P. 309–326.

*Winterwerp J.C.* On the flocculation and settling velocity of estuarine mud // *Cont. Shelf Res.* 2002. Vol. 22. P. 1339–1360.

*Ziegler C.K., Nisbet B.S.* Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir // *J. Hydraul. Eng.* 1995. Vol. 121. P. 773–781.

**MODELING OF SUSPENDED MATTER DISTRIBUTION  
IN MARINE COASTAL AREAS:  
2. TESTING AND PRACTICAL APPLYING OF SM-MODEL**

**K.A. Podgornyi<sup>1</sup>, A.V. Leonov<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Atlantic Research Institute for Fisheries and Oceanography*

*ul. Dm. Donskoy, 5. Kaliningrad, 236000. Russia, e-mail: [kapborok@mail.ru](mailto:kapborok@mail.ru)*

*<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prosp.,*

*Moscow, 117997, Russia, e-mail: [leonov@ocean.ru](mailto:leonov@ocean.ru)*

Submitted 05.09.2017, accepted 25.12.2017

The application of the developed model is shown. It describes the consequences of dredging in the coastal waters (the formation of turbidity spots and the spread of suspended matter over the water area) as well as calculates the values of several parameters characterizing the conditions for the redistribution of suspended matter in the water column and on the bottom surface. These parameters include the duration of the turbidity spot in the water, the change and distribution of the concentration of suspended matter within such a spot, and the accumulation of losses of suspended matter at the bottom for the entire period of work. These parameters are included in the list of characteristics on the base of which damage to biological resources (for example, to benthic organisms) is estimated due to disturbances in their natural habitat after completion of works on bypassing.

**Keywords:** bypassing; model of suspended matter distribution; information for calculations on the model: natural factors (wind, sea currents, temperature and salinity of sea water, properties of sandy bottom sediments); technological data of carrying out dredging works; calculations of ground losses, conditions for the formation of suspended matter, its concentration in water, accumulation at the bottom.

### **Introduction**

Testing the model (selection of empirical parameters, its tuning) is an independent stage of its approbation which involves the use of appropriate observational data. It is intended to test the model (and perform calculations) for the coastal waters of the Baltic Sea for which no preliminary studies on the distribution of turbidity zones have been carried out. However, a certain experience of verification of individual model blocks is available for other water bodies. For example, in the modeling of thermo-hydrodynamic processes, a comprehensive check of operability and mutual consistency of calculations performed with the help of hydrodynamic, thermo-hydrodynamic and hydrobiological modules. A similar procedure for testing of the model has applied for the whole Rybinsk Reservoir and its individual stretches as well as for the Neva Bay Gulf of Finland (Podgornyi, 2009a,b, 2012; Podgornyi, Poddubnyi, 2005, 2009; Poddubnyi, Podgornyi, 2009; Podgornyi, 2010).



The model testing showed that the non-stationary hydrodynamic model can be effectively used not only for solving of hydrological problems themselves, but also for numerical integration of system of the thermo-hydrodynamic and hydrobiological equations in the simulation models of the Rybinsk Reservoir's aquatic ecosystem as well as the HTD–NP–model (Neva Bay). Similar methodology is useful for long periods with the possibility to take into account the intra-annual variability of the meteorological and hydrological conditions, and changes in the water and external biogenic load on the water body.

Verification (non-stationary hydrodynamic model based on observations of flow parameters) showed that the discrepancy between calculated and actual flow velocities at the Rybinsk Reservoir polygons usually does not exceed the error of their measurement (on average 15–20%). Calculations of the current structure in the Neva Bay (Gulf of Finland) showed a good qualitative and quantitative correspondence to the main observable features of the formation of the space-temporal structure of the currents in this water body. The hydrodynamic block of the model designed to reproduce the intra-annual variability of the flow fields for the period of open water, if necessary, can take into account the changes in water flow rates of rivers (or hydro-meteorological conditions for the water body). Testing has shown that these model blocks may use as a basis for the subsequent modeling of the space-temporal variability of a number of variables (water temperature, individual components of the ecosystem, distribution of suspended and dissolved substances in water environment).

The purpose of the research is to provide practical information on the application of the developed SM-model to assess the consequences of dredging or the formation and redistribution of SM in the marine offshore area. As an example of using the modeling methodology, we will review the available information, prepare the data necessary for the calculation, and estimate the values of a number of empirical coefficients for solving the problem: modeling the process of spreading SM in marine coastal waters during dredging (by the example of the coastal section of the Baltic Sea).

### **1. Data required for performing of calculations on SM-model**

To perform calculations on the SM-model, a considerable number of different initial data are required to assess the ecological consequences of work on bypassing influencing the water environment and the habitat of aquatic biological resources. We will perform some sorting of the required data. This will allow user to orient yourself in who, how and where such raw data to collect for similar calculations. Firstly, we make some subdivision of this information into separate groups:

- data for the description of the coastal marine area where work on bypassing is proposed to carry (location of the work area, its boundaries, average and maximum depths, area of the entire site and the immediate area of bypassing work);

- information that characterizes the natural marine environment; it includes data on the hydro-meteorological and hydrological parameters affecting the propagation of SM in the marine environment (depth maps, data on the direction and speed of the wind and

on the most characteristic features of the space-temporal structure of the currents, the temperature  $T_w$  and salinity  $S_w$  of the sea waters;

– data on sandy material in bottom sediments in the work area (granulometric composition, its physical and mechanical properties);

– technological data that determine the conditions for performing work on bypassing (operational characteristics of the work, the scheme of work, the technical characteristics of the vessel and the equipment used for sampling, loading and moving the sediments, the application of which leads to the appearance and spread of the turbidity spot in the coastal zone – in the work area and in adjacent water areas);

– empirical information: a variety of calculated dependencies, correlation relationships that describe the interconnection of oceanological parameters (wind flow characteristics, waves) and the conditions for the SM redistribution; empirical relationships that allow us to estimate the rates of SM sedimentation and the resuspension of the bottom sediments by the values of factors/parameters of the marine environment (wind, waves, current velocities, etc.); values of numerous empirical parameters/coefficients. As a rule, additional studies and test calculations are always required to refine the dependencies and values of the coefficients since there are no universal dependencies for calculating the effect of oceanological parameters (in particular, waves and currents) on the bottom of the water bodies. In this case, both the empirical coefficients of the calculated dependences and the number of considered water flow regimes can differ, as well as the quantitative criteria for their isolation. All this leads to the fact that in the model intended for calculating the propagation of SM, it is necessary to envisage the use of different methods for calculating the values of the hydrodynamic effect on the processes of SM sedimentation and resuspension of the bottom sediments and their possible refinement at the stage of parametric adjustment of the model.

Usually the initial information specified in sections (1.1)–(1.4) is prepared and provided by the organization (or the Customer) which plans to work bypassing and implements them in practice, and the empirical information of section is obtained at the working with the model (debugging, model calibration and execution of actual calculations on the model).

### **1.1. Description of the work area for bypassing**

The proposed area of the work is the coastal zone of the Baltic Sea (Kaliningrad region – from the Taran Cape to the 48 km of Curonian Spit) with a width of 500 m from the water edge towards the shore and to a depth of 30 m towards the sea. The average depth of the water area is 27.5 m (26–29 m), the area of the site is 2.62 km<sup>2</sup>. In this area (depths of 15–30 m) sand can be extracted for artificial washing up beaches in the Kaliningrad region.

On this section of the Baltic Sea, a monitoring area (MA) was identified in the immediate vicinity of the D-6 platform and a section of the underwater coastal slope (UCS).

The amount of dredging works (moving the ground) under the project is assumed equal to 2.100 thousand m<sup>3</sup>, the area of damage to the bottom when sand is extracted to a depth of 1.5 m will be at the landfill of 182 hectares (the site will be passed twice, as at one time a layer of sandy soil extracted is 75 cm).

### 1.2. Information characterizing the natural marine environment

Approximate work period of dredging is from June to October (with a total duration – 180 days). The influence of the natural environment on the processes associated with the formation, distribution and redistribution of SM in the marine environment primarily depends on natural oceanological factors. These include wind, sea currents, temperature and salinity of sea waters, and bottom sediments.

**Wind.** The data of long-term observations (Kaliningrad point) show that the temperate winds of the south-western and western directions prevail over the area in the indicated period (fig. 1). Average monthly wind speeds for these months vary within 3.5–5.5 m/sec, and average wind speeds for the whole work period, summer, and autumn, are 4.0, 3.9, and 4.1 m/sec, respectively. The recurrence of days with a calm in June-August and September-October is 11.9 and 11.5 %, respectively (fig. 2). Note that the data obtained at the coast station of meteorological observations, and they can not quite correspond to data on the wind above the sea surface in the work area.

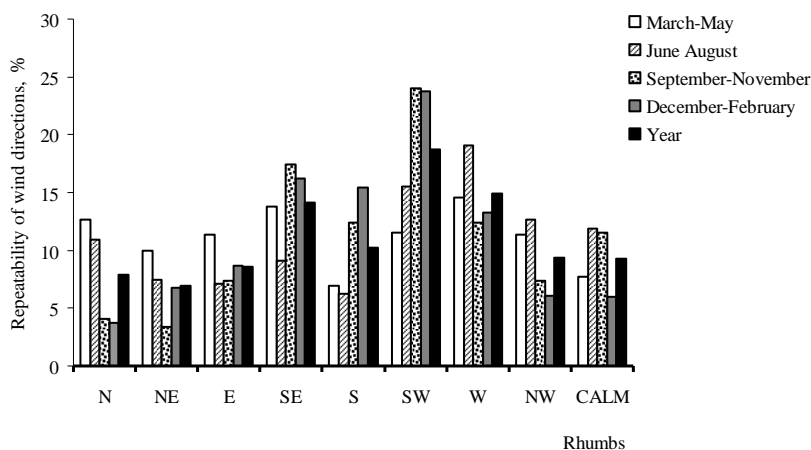


Fig. 1. Repeatability of wind directions by eight rhumbs over the water surface of the work area (according to data for the Kaliningrad point).

The wind data for 2004–2009 was also used for the Baltic Sea. They were obtained with the help of an automatic hydro-meteorological station (AHMS) MLCP D-6 at an altitude of 27 m above sea level (Oil and the environment..., 2012). The standard height of the installation of instruments is 10 m above sea level. Therefore during meteorological observations behind the wind, the recalculation was carried out on the basis of the dependence of the wind speed on the altitude according to Helman’s formula (Oil and the environment..., 2012):

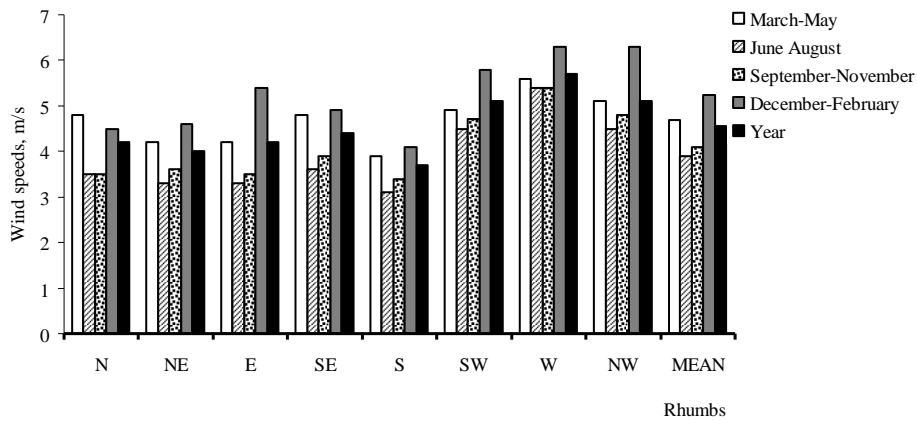


Fig. 2. Wind speeds over eight rhumbs over the water surface of the work area (according to data of the Kaliningrad point).

$$V_h = V_{10} (0.233 + 0.656 \lg(h + 4.75)), \quad (3.1)$$

where  $V_h$  – wind speed at height  $h$ ;  $V_{10}$  – wind speed at an altitude of 10 m above sea level. The results of the calculations are given in Table. 1, and graphically calculated wind speeds and directions with standard deviations averaged for each month of the year for 2004–2009 are shown in fig. 3 and 4.

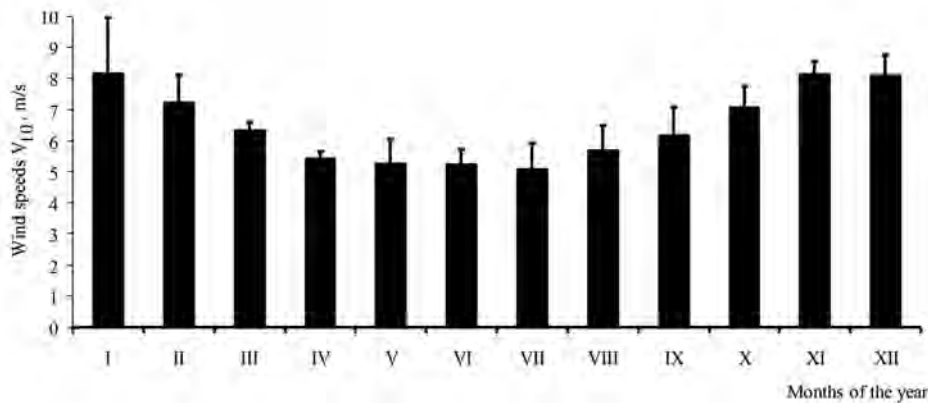


Fig. 3. Wind speeds in the work area at a height of 10 m above the water surface (according to data of the AHMS, located on the MLCPD-6).

Thus, from June to October, over the work area, the average annual wind speed changes within 5.1–7.0 (mean  $5.8 \pm 1.0$ ) m/sec, and the average annual wind directions vary from 207 to 275° (average  $240 \pm 71^\circ$ ). At a height of 10 m directly above the water surface, the wind speed is about 1.5–2.0 m/sec higher compared to the wind speeds measured above the land.

It should be taken into account that in the period of work the probability of a wind of western rhumb is 45–60%, and of northern rhumb – up to 10%. In early autumn, the probability of western winds decreases to 30–40%; the frequency of south-east and south winds is also high (~30%). By October, the probability of the south-eastern and especially southern wind increases, and the south-west wind drops to 15–30% (Oil and the environment., 2012).

Table 1. Recalculation of wind speed and directions according to Helman’s formula, using the data of measurements for 2004–2009 performed on MLCP D-6

Year	Parameter	Month												For year
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2004	$D^\circ$	120	345	275	120	285	270	260	200	285	195	285	270	245
	$V_{27^\circ}$ m/sec	7.5	7.5	7.6	6.7	7.9	6.4	6.8	6.5	9.5	8.6	9.9	9.1	7.8
	$V_{10^\circ}$ m/sec	6.2	6.2	6.2	5.5	6.5	5.3	5.6	5.3	7.8	7.1	8.1	7.5	6.4
2005	$D^\circ$	250	135	20	95	215	270	215	220	190	185	200	165	180
	$V_{27^\circ}$ m/sec	11.2	9.2	7.8	6.5	5.9	6.7	5.1	7.7	6.8	8.8	9.9	10.4	8.0
	$V_{10^\circ}$ m/sec	9.2	7.6	6.4	5.3	4.8	5.5	4.2	6.3	5.6	7.2	8.1	8.5	6.6
2006	$D^\circ$	160	105	175	190	240	310	10	335	220	225	230	250	205
	$V_{27^\circ}$ m/sec	7.5	7.5	7.1	6.5	7.2	5.3	4.9	5.9	6.9	9.0	9.5	10.7	7.3
	$V_{10^\circ}$ m/sec	6.2	6.2	5.8	5.3	5.9	4.4	4.0	4.8	5.7	7.4	7.8	8.8	6.0
2007	$D^\circ$	255	120	200	295	215	235	255	265	245	330	250	210	240
	$V_{27^\circ}$ m/sec	12.1	9.8	7.9	6.9	5.8	6.7	7.2	6.9	8.1	8.0	9.4	9.2	8.2
	$V_{10^\circ}$ m/sec	9.9	8.0	6.5	5.7	4.8	5.5	5.9	5.7	6.6	6.6	7.7	7.6	6.7
2008	$D^\circ$	195	250	230	55	10	265	320	250	55	230	225	180	190
	$V_{27^\circ}$ m/sec	12.3	10.0	7.7	6.2	5.4	6.1	5.9	8.4	7.1	9.8	10.9	9.0	8.2
	$V_{10^\circ}$ m/sec	10.1	8.2	6.3	5.1	4.4	5.0	4.8	6.9	5.8	8.0	8.9	7.4	6.8
2009	$D^\circ$	180	240	125	80	75	295	335	245	245	250	280	185	210
	$V_{27^\circ}$ m/sec	9.0	8.6	8.1	6.8	6.3	6.9	7.2	6.1	6.5	7.3	9.7	10.6	7.8
	$V_{10^\circ}$ m/sec	7.4	7.1	6.6	5.6	5.2	5.7	5.9	5.0	5.3	6.0	8.0	8.7	6.4

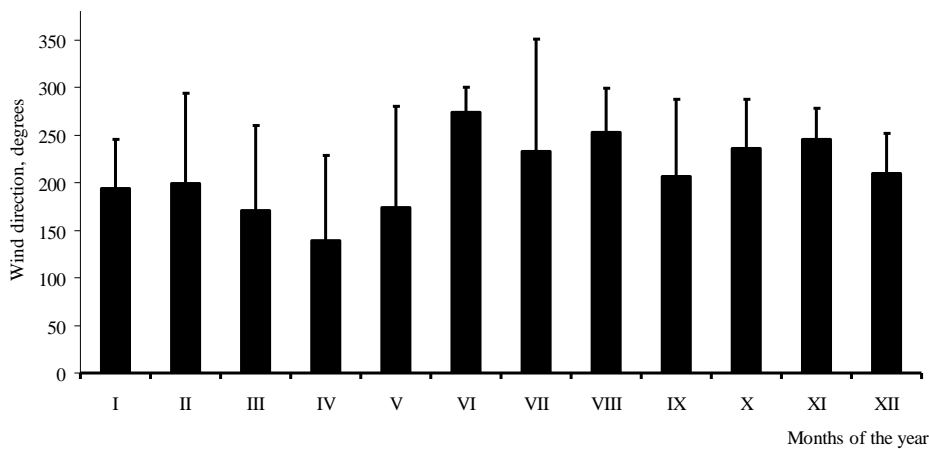


Fig. 4. Wind directions over the water surface of the work area (according to data for AHMS, located on MLCPD-6).



**Currents.** The main factors in the formation of intensity, direction and vertical structure of currents in the MA district are wind influence on the sea surface, seasonal variability of hydro-meteorological and hydrological conditions and inertial effects of Earth's rotation (Oil and the environment..., 2012). The current velocity in the district of MLCP D-6 during the observation period did not exceed 20 cm/sec, and its average at the surface and in the bottom layer was ~ 10–12 and 6–10 cm/sec, respectively.

Under certain conditions in summer, a layered structure of currents can be established due to thermocline development and space-temporal dynamics of inertial oscillations (Oil and the environment..., 2012). The passage of an intense wind disturbance (cyclone) can cause a local, uniform deep circulation. Such currents are characteristic for the autumn period, they vary depending on the variability of the wind.

**Temperature  $T_w$  and salinity  $S_w$  of sea waters.** During 2003–2008 on the selected sections of the Baltic Sea, 20 surveys of hydrological observations of  $T_w$  and  $S_w$  were performed (Oil and the environment..., 2012). For the MA region, the average summer (in July)  $T_w$  on the sea surface was 18.2 °C, and the average annual – 10.4 °C. In summer,  $S_w$  is minimal (7.05 ‰) with an average annual value of 7.17 ‰ (Table 2).

In July and October–November, the average  $T_w$  for the 0–20 m layer on the UCS area was 16.0 and 12.3 °C respectively, and for the 0–30 m layer in the MA region – 14.8 and 12.7 °C in the same months. The average  $S_w$  for the 0–20 m layer for the UCS area was 7.03 and 7.01 ‰ in July and October–November respectively, and for the 0–30 m layer  $S_w$  for the MA region was 7.2 ‰ for the same periods.

Table 2. Season-average values of  $T_w/S_w$  (°C/‰) for 2003–2008 (Oil and the environment..., 2012) ( $\sigma$  – standard deviations values of  $T_w$  and  $S_w$ ; MA – monitoring area, UCS – underwater coastal slope)

Depth, m	Mean for 2003–2008							
	July				October/November			
	UCS	$\sigma$	MA	$\sigma$	UCS	$\sigma$	MA	$\sigma$
0	18.57 / 6.91	2.18 / 0.16	18.20 / 7.05	2.59 / 0.20	12.19 / 6.89	3.10 / 0.72	12.72 / 7.12	2.66 / 0.45
5	17.90 / 6.93	1.97 / 0.17	17.72 / 7.05	2.34 / 0.20	12.22 / 6.99	3.08 / 0.34	12.74 / 7.16	2.65 / 0.24
10	15.99 / 6.99	3.00 / 0.22	16.36 / 7.10	2.27 / 0.19	12.09 / 7.00	3.14 / 0.35	12.70 / 7.16	2.68 / 0.24
15	14.20 / 7.12	2.65 / 0.18	14.55 / 7.20	1.88 / 0.12	12.30 / 7.08	3.33 / 0.16	12.89 / 7.22	2.54 / 0.14
20	13.60 / 7.20	2.70 / 0.09	13.14 / 7.25	2.16 / 0.10	12.57 / 7.09	3.57 / 0.17	12.94 / 7.23	2.51 / 0.13
30	–	–	8.90 / 7.34	3.47 / 0.10	–	–	12.44 / 7.27	2.76 / 0.13
40	–	–	5.13 / 7.43	2.42 / 0.11	–	–	8.93 / 8.18	3.85 / 3.91
50	–	–	3.99 / 7.51	1.37 / 0.14	–	–	6.45 / 7.62	3.83 / 0.40
60	–	–	3.37 / 7.82	0.96 / 0.74	–	–	4.52 / 8.39	1.56 / 0.96
70	–	–	4.31 / 8.58	0.65 / 0.60	–	–	5.17 / 9.87	0.62 / 0.84
80	–	–	5.34 / 10.31	0.94 / 1.11	–	–	5.67 / 11.13	0.58 / 0.68
90	–	–	6.39 / 11.74	0.73 / 0.68	–	–	5.90 / 11.49	0.54 / 0.53
100	–	–	6.71 / 12.43	1.13 / 0.52	–	–	6.72 / 12.21	0.80 / 1.00
110	–	–	6.75 / 12.59	1.14 / 0.52	–	–	6.69 / 12.41	0.73 / 0.92

### 1.3. Characteristics of sand material in bottom sediments of the work area

The initial sand material at the site of work includes sand particles of different sizes (from 0.2 to 2 mm or from small to coarse grains). The granulometric composition of the sand intended for washing up deposits is presented in Table. 3.

The value of the resistance coefficient  $C_D$  for the two-dimensional version of the hydrodynamic module is calculated using the ratio (2.18) (Podgornyi, Leonov, 2017):

$$C_D = 0.16 \left( 1 + \ln \left( \frac{Z_0}{Z_w} \right) \right)^{-2},$$

where  $Z_0$  is some average scale of the height of the roughness protrusions on the bottom, determined by the equation  $Z_0 = D_{50}/12$  ( $D_{50}$  is the mean-weighted size of particle dependent on the percentage contribution of particles with different types and sizes present in the sediment layer in the water body) (Stanev et al., 2009);  $Z_w$  is the water depth for the place of study.

Data on the granulometric composition of the sand allow us to determine the limits of the change in the scale of the roughness protrusions  $Z_0$  for the area under which the calculations are performed. On the basis of Table 3, we will calculate the values of  $D_{50}$  for the upper and lower boundaries of the size intervals:

– for the upper boundary of the considered intervals –

$$10 \times 0.003 + 2 \times 0.033 + 1 \times 0.053 + 0.5 \times 0.683 + 0.25 \times 0.212 + 0.1 \times 0.016 = 0.545 \text{ (mm)};$$

– for the lower boundary of the considered intervals –

$$2 \times 0.003 + 1 \times 0.033 + 0.5 \times 0.053 + 0.25 \times 0.683 + 0.1 \times 0.212 + 0.05 \times 0.016 = 0.258 \text{ (mm)}.$$

Thus, the values of  $D_{50}$  for the upper and lower boundaries of the size intervals are 0.545 and 0.258 mm, respectively, and the average scales  $Z_0$  of the height of the roughness protrusions on them are  $Z_0 = 0.045$  mm (or  $4.5 \times 10^{-5}$  m) and 0.022 mm (or  $2.2 \times 10^{-5}$  m), and the average scale  $Z_0 = 0.034$  mm (or  $3.4 \times 10^{-5}$  m).

According to the data on the granulometric composition of the transported sediments (Table 3), we also calculate the effective rate of sedimentation using the dependence (Methodological guidelines..., 2003):

$$W_s = \frac{\sum_{n=1}^M (W_s)_n P_n}{P}, \quad (3.2)$$

where  $M$  is the number of isolated fractions of ground particles  $\leq 0.1$  mm in size;  $(W_s)_n$  – the hydraulic size of the individual  $n$ -th fractions of particles (determined from Table 4), cm/sec;  $P_n$  – the weight content in the soil of individual  $n$ -th fractions of particles of  $\leq 0.1$  mm in size, in fractions of a unit;  $P$  – weight total content in the soil of particles of  $\leq 0.1$  mm in size, in fractions of a unit.

Now we estimate for  $T_w = 15$  °C the average effective sedimentation rate based on the data of Table 3 and 4, and this rate will be

$$W_s = (0.1864 \times 0.016 + 0.679 \times 0.212) / (0.016 + 0.212) = 0.64 \text{ sm/sec (or } 0.0064 \text{ m/sec)}.$$

Table 3. The granulometric composition of sand, presumed to be deposited  
(\*medium-grained sand)

Type of sediment	Fraction, mm							Amount
	100–10	10–2	2–1	1–0.5	0.5–0.25*	0.25–0.1	0.1–0.05	
	Content, %							
ПС	0.0	0.3	3.3	5.3	68.3	21.2	1.6	100.0

Table 4. Hydraulic size of the slurry  $W_s$ , sm/sec (Methodological guidelines..., 2003)

Diameter of particles, mm	$T_w$ , °C				
	5	10	15	20	25
0.05	0.1426	0.1640	0.1864	0.2097	0.2340
0.1	0.530	0.604	0.679	0.755	0.833

It is assumed that for the simple case, the flocculation process will not be taken into account in calculations.

#### 1.4. Technological data defining the conditions for the performance of work

We estimate for the work period (from June to October with total duration 180 days) the values of the parameters required in the model for calculations.

It is assumed that for work on bypassing, the self-hauling bilge pump “BRABO” will be used. The maximum capacity of its holds is 11650 m<sup>3</sup> (at the upper overflow level). The cargo capacity of the hold is 18397 tons. The average speed of the movement is 10 knots (18 km/h) with an average distance 18 km to the working place. The time spent per one trip is 10 hours (6 hours for dredging, 2 hours for moving from the place of work to the place of unloading and back and 2 hours for unloading the cargo hold through the pipelines system).

To move 2.1 million m<sup>3</sup> of sand material, 180 trips should be make (on 10 hours for each trip), and total time for entire work on bypassing is 1800 hours. The speed of the vessel during the deepening is 2 km/h. Loading of soil into the bilge will be carried out with overflow (estimated coefficient of soil loss at dredging of 0.3 for medium-grained sands).

The projected volumetric weight of the soil is 1.52 t/m<sup>3</sup>. The total capacity of a single water-pumping pump for dredging is 2100 m<sup>3</sup>/h, and when working with two pumps – 4200 m<sup>3</sup>/h.

At the dredging by self-hauling dredgers with hydrodusters, the most extensive turbidity zones are formed at the bottom when the rippers are working before sucking. The overflowing from the hold of the dredge may be registered when it is filled, and it is possible to form turbidity zones on the water surface. When dredging in soils with an

effective sedimentation rate of a suspension of  $W_s \leq 0.2$  cm/sec, a cloud of turbidity can be propagated (rising) from the bottom to the middle of the water depth (Methodological guidelines...., 2003).

Thus, taking into account the possible overflow from the hold of the dredge while filling it, the expected cloud of turbidity will cover the entire water column of the considered water area in the dredging region.

### 1.5. Calculation of ground losses for the formation of suspensions during dredging operations

The main data in determining the characteristics of the turbidity spot at the dredging are the effective sedimentation rate of the SM,  $W_s$ , and the loss  $q$  of the soil consisting into the suspended form. The calculation  $W_s$  was performed as shown above and the result is 0.64 sm/sec (or 0.0064 m/sec). Losses  $q$  in t/sec are calculated by the equation (Methodological guidelines...., 2003):

$$q = \left( PkQ\gamma_s \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right) / 3600, \quad (3.3)$$

where  $P$  – the weighted total content in the soil of particles of  $\leq 0.1$  mm in size, in fractions of the unit forming the zone of increased turbidity (determined from the data on the granulometric composition of the soil dredging);  $k$ – coefficient of soil transformation into the suspension during the operation of technical means (spillage), in fractions of a unit;  $Q$  – the productivity of the technical means on the ground, m<sup>3</sup>/h (determined by the technological characteristics of the dredge);  $\gamma$  – the projected volumetric weight of the soil in a state of natural construction, t/m<sup>3</sup>;  $\gamma_w$  – the volume weight of water, t/m<sup>3</sup>;  $\gamma_s$  – the specific gravity of ground particles, t/m<sup>3</sup>.

The value  $P$ , according to the data on the granulometric composition of the dredging is  $0.016 + 0.212 = 0.228$ . In the absence of data to determine the coefficient  $k$  at the operating technical means, we assume tentatively that  $k = 0.05$  (5 %) (Methodological guidelines...., 2003). The total capacity  $Q$  of technical facilities (two pumps for loosening) on the ground is 4200 m<sup>3</sup>/h. The projected volumetric weight  $\gamma$  of the soil is assumed equal to 1.52 t/m<sup>3</sup>. The volume weight  $\gamma_w$  of water = 1.0 t/m<sup>3</sup>. The coefficient of soil porosity is 0.67 (according to laboratory tests of their physico-mechanical properties). Then the specific gravity of soil particles is  $\gamma = \gamma/0.67 = 1.52/0.67 = 2.27$  t/m<sup>3</sup>.

Thus, the loss  $g$  of soil particles passing into the slurry (when dredging with two hydraulic loosening pumps) and forming of turbidity zone (taking into account the physical and mechanical properties of the developed soil) will amount to

$$q = \left( 0.228 \cdot 0.05 \cdot 4200 \cdot 2.27 \cdot \frac{1.52 - 1.0}{2.27 - 1.0} \right) / 3600 = 0.01236167(t/sec).$$

Taking into account that  $1 t = 10^6 g$ , we obtain that  $q$  will be 12361.67 g/sec.

### 1.6. Calculation of soil losses for the formation of suspensions when loading soil in the hold of the dredger with overflow

When the soil is loaded into the hold of the dredger with overflow, the most extensive zones of the suspension are formed on the water surface with a gradual lowering of suspensions content into the depths. The main initial data for determining the characteristics of the turbidity spot during overfilling are the effective sedimentation rate  $W_s$  and the mass  $G$  of the soil, which passes into a suspended state. The value  $W_s$  estimated above is 0.64 sm/sec (or 0.0064 m/sec). Soil mass  $G$  in t is calculated by the equation (Methodological guidelines..., 2003):

$$G = Pk_1V\gamma_s \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w}, \quad (3.4)$$

where  $P$  – the weighted total content in the soil of particles of  $\leq 0.1$  mm in size, in fractions of unit, forming the zone of increased turbidity (determined from the data on the granulometric composition of the bottom of the dredging);  $k_1$  – coefficient of ground transformation into a weighed state at overflow during operation of technical means, in fractions of a unit;  $V$  – loading rate of the ship's hold in terms of volume in the state of natural addition,  $m^3$  – is determined by the technological characteristics of the dredge;  $\gamma$  – projected volumetric weight of soil in a state of natural addition,  $t/m^3$ ;  $\gamma_w$  – volumetric weight of water,  $t/m^3$ ;  $\gamma_s$  – specific gravity of soil particles,  $t/m^3$ .

Coefficient  $k_1 = 0.3$ . The maximum capacity  $V$  of the hold at the upper level of overflow is 11650  $m^3$ . Thus, the total mass of soil particles  $G$  that have passed into the suspended state as a result of overflow and forming a turbidity zone for a single time of dredging (6 h), in accordance with equation (3.4) is estimated as

$$G = 0.228 \cdot 0.3 \cdot 11650 \cdot 2.27 \cdot \frac{1.52 - 1.0}{2.27 - 1.0} = 740.640586 \text{ t},$$

which is approximately 4 % of the load capacity of the dredge hold (equal to 18397 tons). Knowing the value  $G$ , we can now estimate the amount of soil particles  $G^*$  that pass into the slurry during dredging as a result of overflow in one second:

$$G^* = G / (6 \cdot 3600) = 740.640586 / (6 \cdot 3600) = 0.03428892 \text{ t/sec.}$$

Taking into account that 1 t =  $10^6$  g, we find that the loss  $G^*$  is 3428892 g/sec.

### 1.7. An estimate of the average vertical concentration of the total SM concentration in water during dredging and loading of soil into the hold of the dredger with overflow

According to the above calculations, at the dredging and loading of soil into the hold of the dredge with overflow, the input of SM, equal to  $12361.67 + 34288.92 = 46650.59$  g,



will delive every second into the water column. For 6 hours of daily operation, the area of the bottom damage will be equal to  $\frac{1.82 \times 10^6}{180} = 10111.1 \text{ m}^2$ , and  $46650.59 \times 3600 \times 6 = 1007652744 \text{ g}$  (or  $\approx 1007.65$  tons) will be delivered in the water column. At an average depth of 27.5 m of the water area of the work region, we obtain that the average vertical concentration of the total concentration of SM entering the water every second during dredging and loading of soil into the hold of the dredger with overflow will be  $46650.59 \text{ g} / (1 \text{ m}^2 \times 27.5 \text{ m}) = 1696.39 \text{ g/m}^3$  (or 1696.39 mg/L).

### 1.8. Parameters of the grid area

For calculations, the grid area should be determined for the water area within which the soil sampling will be carried out. We propose a grid of an area with 50 nodes along the horizontal axis  $OX$  and 31 – along the vertical axis  $OY$  (or with a total number of nodes  $50 \times 31$ ). Spatial steps along the grid axes will be denoted  $(\Delta s)_x$ ,  $(\Delta s)_y$  respectively with respect to the spatial coordinates  $x$  and  $y$ . They are assumed to be constant and amount to 250 m. Thus, the dimensions of the calculated area are  $49 \times 250 \text{ m} = 12250 \text{ m}$  along the  $OX$  axis and  $30 \times 250 \text{ m} = 7500 \text{ m}$  along the  $OY$  axis. They outline a larger area in comparison with the actual area of the work area for the dredging.

All the boundaries of the grid area are open. The values of the environmental parameters (current velocities, sea level changes) at open borders are not known from observations, therefore zero values of the free surface level will be given for calculations at these boundaries. The sizes of the calculated area are quite large in comparison with the dredging area, and it itself is located at a sufficient distance from the boundaries, so the uncertainty of the given boundary conditions in the calculation of the currents will not lead to significant distortions in the design velocities and directions of the currents.

The maximum depth  $H_{max}$  within the grid area covering the water area of the work site is 36.3 m. The time step  $\tau$  depends on the steps  $(\Delta s)_x$ ,  $(\Delta s)_y$  of the grid over on the spatial coordinates. At the choosing  $\tau$ , it is necessary to ensure the codition that the stability criterion of Courant-Friedrichs-Levy calculations (CFL) is satisfied, according to which the inequality should be

$$\tau < \frac{(\Delta s)_{x,y}^{max}}{\sqrt{gH_{max}}}, \quad (3.5)$$

where  $(\Delta s)_{x,y}^{max}$  is the largest step of the grid with respect to the spatial coordinates (in this case  $(\Delta s)_{x,y}^{max} = (\Delta s)_x = (\Delta s)_y = 250 \text{ m}$ ).

After substituting in the equation (3.5) all the required numerical values of the parameters, we find that for numerical integration of the system of hydrodynamic equations the time step must be  $< \frac{250}{\sqrt{9.81 \cdot 36.3}} = 13.25 \text{ sec}$ . For the convenience of calculations, we assume that the time step  $\tau$  will be 10 seconds.

We will use the same time step at the numerical integration of the system equations of evolutionary advection and turbulent diffusion in the calculation of the transport of SM for the region of dredging.

We use the speed of the vessel during the deepening equal to 2 km/h. Suppose that the input of SM into the marine environment (as a result of dredging and overflow) will occur “pointwise” at the corresponding nodes of the calculation grid. Accordingly, “moving” the vessel to the next node at the selected step of the calculation grid 250 m and a time step of 10 sec will occur every 45 steps in time according to the proposed scheme of the vessel “moving” (Fig. 5).

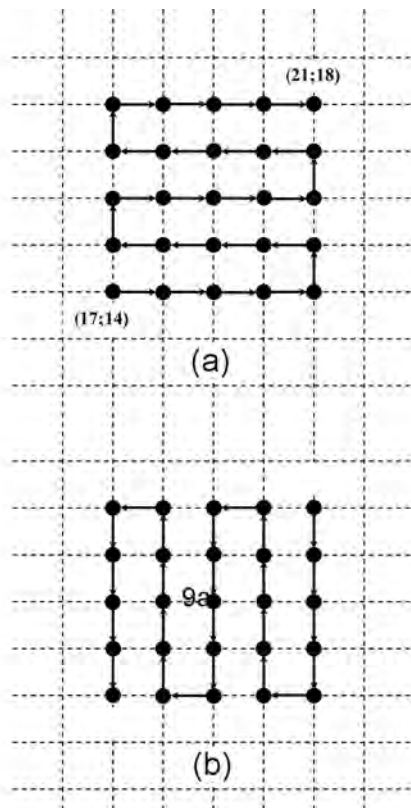


Fig. 5. Scheme of vessel «moving» within the calculation field in the dredging area: (a) – moving from the node with grid coordinates (17; 14) to the node with grid coordinates (21; 18); (b) is a reverse movement from a node with grid coordinates (21; 18) to a node with grid coordinates (17; 14).

The specified start time for the beginning of work is 9 hours and for its end – 15 hours.

### 1.9. Estimation of the coefficient of horizontal turbulent exchange $(A_n)_n$

To estimate the value of horizontal turbulent exchange coefficient  $(A_n)_n$  for the size fraction  $n$ , we use equation (2.39) (Afanasyev, Ryzanzhin, 1986):

$$(A_n)_n = \alpha \left( (\Delta s)_x (\Delta s)_y \right) \sqrt{2 \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2}$$

where  $(\Delta s)_x$ ,  $(\Delta s)_y$  – grid steps for spatial coordinates  $x$  and  $y$  respectively; coefficient  $\alpha = 0.1$ . In calculating the spatial derivatives  $\partial U/\partial x$ ,  $\partial U/\partial y$ ,  $\partial V/\partial x$ ,  $\partial V/\partial y$ , a central-difference approximation was used.

### 1.10. Estimation of the critical values of the tangential stress at the bottom of the water body determining the onset of SM sedimentation and the bottom sediment resuspension

The SM sedimentation and the resuspension of bottom sediment will occur only when the value of the tangential stress at the bottom of the water body  $\tau_{bottom}$  will be either  $< \tau_{C_n}^{crit\_sed}$  or  $\tau_{C_n}^{crit\_resusp} >$  respectively (Podgorny, Leonov, 2017). Critical values  $\tau_{C_n}^{crit\_sed}$  and  $\tau_{C_n}^{crit\_resusp}$  vary within the fairly wide ranges and should be selected according to the results of model calibration used for the study of the sediment transport in lakes, coastal zones of the seas and sea bays. Existing studies and modeling experience show that the values  $\tau_{C_n}^{crit\_sed}$  vary in the range 0.0–0.18 N/m<sup>2</sup> ( $N$  is a Newton as force unit), and the values  $\tau_{C_n}^{crit\_resusp}$  – in range from 0.009 to 0.25 N/m<sup>2</sup> (Chao et al., 2008; Hamilton, Mitchell, 1996; Lou et al., 2000; Mehta, Partheniades, 1975; Ziegler, Nisbet, 1995).

We estimate the approximate value  $\tau_{bottom}^{curr}$  by formula (2.17) (Podgorny, Leonov, 2017). Taking into account the bathymetry of the work area, it can be concluded that the contribution of the term  $\tau_{bottom}^{curr}$  at the calculation will be decisive. With an average scale height  $Z_0$  of ridges of roughness equal to  $3.4 \times 10^{-5}$  m, an average depth of the water area of the work area – 27.5 m, a water density of 1000 kg/m<sup>3</sup>, and a flow velocity of 0.1 m/sec, we obtain

$$C_D = 0.16 \left( 1 + \ln \left( \frac{Z_0}{Z_w} \right) \right)^{-2} = 0.16 \left( 1 + \ln \left( \frac{3.4 \cdot 10^{-5}}{27.5} \right) \right)^{-2} = 0.0010073;$$

$$\tau_{bottom}^{curr} = \rho_w C_D (U^{curr})^2 = 0.0010073 \cdot 10^3 \cdot (0.1)^2 \approx 0.01 \text{ N/m}^2.$$

Based on the estimate obtained, we take as the first approximation that  $\tau_{C_n}^{crit\_sed} = 0.01$ , and  $\tau_{C_n}^{crit\_resusp} = 0.02 \text{ N/m}^2$ .

## 2. Results of calculations on the sm-model

With the help of the SM-model, we now calculate the main indicators by which we can judge the effect of dredging on the formation and presence of turbidity spots, the time spent in the water in the turbidity spot, and the thickness of the SM layer accumulated on the bottom surface during the settling of SM.

### 2.1. The space-time structure of the turbidity fields

Calculations on the SM-model were carried out to show every 30 minutes the position of the boundaries of the turbidity zones of water and the values of the square of such zones. Taking into account the average long-term data on wind (speed and direction) over the water area of the work site (Figures 3, and 4), calculations were made for wind speed 6 m/sec and different directions – W (270°), NW (225°), S (180°), and NE (45°).

Table 5. An example of calculating the parameters of turbidity zones and their areas at a wind speed of 6 m/sec and its direction on the W (270°)

Tim (hour, minute)	Maximum content of SM in a zone of turbidity, mg/L	Square of a zone of turbidity, m <sup>2</sup>	Square of a turbidity zone with additional concentration of SM 50 mg/L, m <sup>2</sup>	Quota of turbidity zone square with additional concentration of SM 50 mg/L from total square of a turbidity zone, %
9 h 00 min	382.5	689741.5	468055.0	67.9
9 h 30 min	3597.0	1034550.6	993744.8	96.1
10 h 00 min	3377.3	949442.5	911410.1	96.0
10 h 30 min	3277.3	1047468.1	1003093.3	95.8
11 h 00 min	3810.8	892390.5	862566.0	96.7
11 h 30 min	3881.6	890871.0	861316.2	96.7
12 h 00 min	3000.4	1263049.5	1190047.5	94.2
12 h 30 min	4107.4	891160.0	859584.5	96.5
13 h 00 min	2980.5	1258648.9	1144712.5	91.0
13 h 30 min	3047.6	1224402.6	1165292.5	95.2
14 h 00 min	4353.1	883897.2	851620.4	96.4
14 h 30 min	4442.9	877430.2	843723.7	96.2
15 h 00 min	4427.4	880681.6	846016.5	96.1

The areas of turbidity zones of water were estimated with the help of the Software package “Surfer” (version 8.01).

An example of appropriate calculations for wind speed 6 m/sec and its direction to W (270°) is given in Table 5, and graphically – in Fig. 6. The total area of water turbidity zone with an additional concentration of SM (>50 mg/L) and particle size <0.14 mm was calculated taking into account the specific positions of the boundaries of the turbidity zones and the possible intersection of the zones at one or another periods of time. The simulation data show that the maximum SM concentrations in the zones of additional turbidity at different times varied within 3.0–5.0 g/L. The area of the turbidity zone during the work varied from 0.69 to 1.32 km<sup>2</sup>. The share of the turbidity zone square with an additional concentration of SM (50 mg/L) was 91–97 % from the total area of the turbidity zone.

To calculate the volume of water with an additional concentration of SM, the total area of the turbidity zone was multiplied by the average depth (27.5 m) of the work area. The simulation data show that the volumes of turbidity zones during the work varied from 0.0190 to 0.0363 km<sup>3</sup>. Similar calculations at a wind speed of 6 m /sec and its variable directions to SE (225°), S (180°) and SE (45°) showed that the differences in the final values of the calculated indicators are insignificant.

The total SM concentration entering to the water every second as a result of dredging and loading by soil into the hold of the dredger with overflow is sufficiently high (1696.39 mg/L). The formation of the turbidity spot, the duration of its existence with

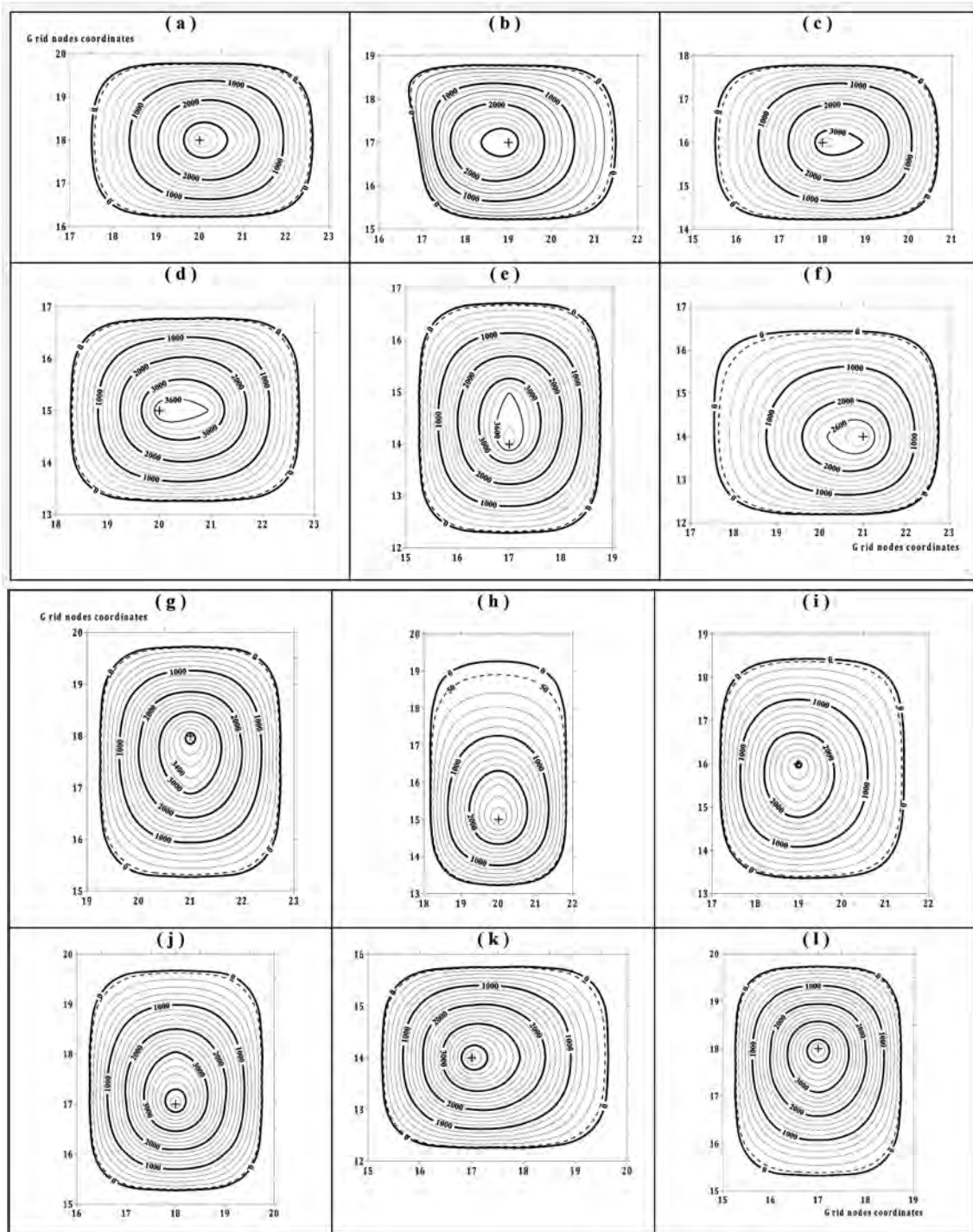


Fig. 6. Position of the spot in the additional turbidity zone and the value of the SM concentration (mg/L) at a wind speed of 6 m/sec, and the wind direction to W (270°) at the following calculated times: (a) – 9 hours 30 minutes, (b) – 10 h , (c) – 10 h 30 min, (d) – 11 h, (e) – 11 h 30 min, (f) – 12 h, (g) – 12 h 30 min, (h) – 13 h, (i) – 13 h 30 min, (j) – 14 h, (k) – 14 h 30 min, (l) – 15 h (completion of dredging operation). The symbol «+» indicates the current position of the dredging vessel at a predetermined design time. The dashed line shows the calculated position of the isolines, which correspond to a concentration of SM = 50 mg/L for the zone of additional turbidity in water environment.



respect to time, and the SM concentration within the spot are controlled by the rates of processes of SM deposition and transport by currents. The gravitational deposition of SM is of decisive importance.

According to calculations, the maximum SM concentrations inside the turbidity zones during the work period do not exceed 10–15 g/L. However, the turbidity spot usually remains in the water for no more than 1 hour after the completion of dredging work and loading the hold of the dredge with soil.

## 2.2. Calculation of the thickness of the SM layer deposited on the bottom surface

We will assume that for each working day, the volume and thickness of the SM layer accumulated at the bottom will be  $V_{sed}$  (m<sup>3</sup>) and  $h_{sed}$  (m) respectively. We also denote the area  $S_{sed}$  (m<sup>2</sup>) on which the SM falls. This area is equal to the area with an additional concentrations of SM (> 50 mg/L) with particle size <0.14 mm.

The volume weight of the soil  $\gamma$  (t/m<sup>3</sup>) in the natural state is equal  $M_{sed}/V_{sed}$  where  $M_{sed}$  is the mass of the sediment settling to the bottom (t), and  $V_{sed} = S_{sed} \times h_{sed}$ .

According to available data,  $\gamma = 1.52$  t/m<sup>3</sup>. Calculations show that a result of dredging work and loading of soil into the hold of the dredge with overfilling is 46650.59 g of SM, and the amount of SM which enter into the water column (with depth  $H$ ) every second is  $46650.59 \text{ g} \times 3600 \times 6 = 1007652744$  g of SM (or 1007.653 t SM). In this case, the value of  $S_{sed} = 207.3$  ha/day of work. Then the thickness of the layer of precipitated SM,  $h_{sed}$  per day, is determined by the following formula:

$$h_{sed} = \frac{M_{sed}}{\gamma S_{sed}}. \quad (3.6)$$

Substituting in this relation the numerical values of the parameters, we obtain

$$h_{sed} = \frac{1007.653}{1.52 \cdot 207.3 \times 10^4} \approx 3.2 \times 10^{-4} \text{ m}.$$

For 180 days, as stipulated in the work plan, the thickness of the SM layer of precipitation falling to the bottom will be  $3,2 \times 10^{-4} \cdot 180 \approx 0,06$  m (or ~ 6 cm).

The account of wave movement of waters at the performance of model calculations is made only for shallow water bodies. For similar water areas (bays, lagoons, estuaries of rivers), the account of the wave influence on the SM distribution is important because it determines the rates of SM settling and bottom sediment resuspension as well as the duration of the turbidity spots existence in the water.

To take into account the wave motion of water, according to theoretical developments (Shore protection..., 1984), the inequality ( $Z_w/L_{wave} < 1/25$ , where  $Z_w$  – the depth of the section of the water body,  $L_{wave}$  – the length of the wind wave) should be satisfied. In this case, the bypassing area was chosen for the coastal area of the Baltic Sea with depths of 15–30 m, for which  $Z_w/L_{wave} > 1/25$ . Consequently the wave action factor in this case may not be taken into account in the calculations.

### 3. Conclusions

Selection of empirical parameters of the model (or the model calibration, its testing and verification) requires the presence of appropriate data of observations. There is an especially acute problem for the data of observations on the spatial SM distribution in the proposed area of dredging. As a rule, such data are not complete, and most often they are absent altogether. Therefore, whenever a model calculation is performed, the researcher faces a complex question about the adequacy of the model calculations performed. In this case, obviously, we can not say now about the comparison of calculation results with observations. Nevertheless, even in the lack of full-scale data, the modeling results provide a lot of useful information on the spreading suspension processes in marine coastal areas. In particular, modeling allow us quantitatively estimate the significance of various processes in the formation of the space-temporal structure of turbidity fields, and also in the calculating the damage to aquatic biological resources that can be caused as a result of dredging works.

The performed model calculations showed that for the considered coastal water area of the Baltic Sea with depths of 15–30 m, the process of formation of the turbidity spot, the duration of its presence and the SM concentrations inside the spot are determined by the rates of processes of SM deposition and its transport by currents. The gravitational deposition of SM is most significant affecting these individual processes.

Maximum SM concentrations within the turbidity zones during dredging can exceed 3–4 g/L. The total operating time of the dredger work is 6 h, the average settling velocity is  $\sim 0.65$  sm/sec, and the total time of its settling at different depths should be 45–85 minutes. Thus, the average time of the turbidity spot presence in the water after the completion of the dredging and the loading of the soil into the hold of the dredge does not exceed 1 hour. If we additionally take into account that the hydraulic size of the particles with a diameter of 0.05–0.1 mm is  $\sim 0.2$  sm/sec, and the time of gravitational subsidence of this fraction at depths of 15–30 m will be 125–250 minutes. However, the quota of this fraction, according to the granulometric composition of SM, is only 1.6 %. Therefore, it can be assumed that the average residence time of the turbidity spot in the water during dredging and after their completion is 8–10 hours.

An important result of the model calculations concerning of the SM diffusion during dredging is the possibility to estimate the thickness of the layer of SM precipitation at the falling to the bottom. This value is estimated at 6 cm.

The work on bypassing violates the natural habitats of aquatic biological resources (in particular, benthic organisms). The obtained values of the parameters, characterizing the changing conditions for the redistribution of SM concentrations in water environment and on the bottom surface, can be used for the subsequent assessments of damage caused by dredging to aquatic biological resources.

In this paper, we show all the main necessary steps for the preparation and practical application of the developed SM-model for assessing the consequences of dredging – the SM formation and its redistribution in the marine offshore area. Unfortunately, at this point in time, not all stages of the model check can be performed due to a lack of necessary observational data. Nevertheless, even these preliminary calculation results allow us to conclude that the model is operational, its capabilities to give realistic results and to conduct further assessments of the possible damage to water biological resources. Similar damage can be associated with the performance of various types of work in which some external mechanical effect on bottom sediments and the formation of additional turbidity zones in the aquatic environment is expected.

The developed model allows to significantly expand the potential capabilities of already available mathematical models that have undergone comprehensive testing and verification, proved their efficiency, and are practically used for studying the processes of biohydrochemical transformation of biogenic substances and the dissolved oxygen dynamics in the aquatic environment. An important addition to the previous models is fact that now there is a real possibility to take into account the wind and hydrodynamic effects on the bottom sediments, the processes of SM precipitation and the bottom sediment stirring up, and also (if necessary) the processes of flocculation and/or different types of dredging.

### References

- Afanasyev S.V., Ryanzhin S.V., Numerical simulation of horizontal turbulent diffusion in a shallow lake, *Vod. Resources*, 1986, Vol. 13, No. 1, pp. 87–94, [In Russian].
- Chao X., Jia Y., Shields Jr. F.D., Wang S.S.Y., et al., Three-dimensional modeling of cohesive sediment transport and wind wave impact in a shallow oxbow lake, *Adv. Water Res.*, 2008, Vol. 31, pp. 1004–1014.
- Hamilton D.P., Mitchell S.F., An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes, *Hydrobiologia*, 1996, Vol. 317, pp. 209–220.
- Lou J., Schwab D.J., Beletsky D., Hawley N., A model of sediment resuspension and transport dynamics in the southern Lake Michigan, *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol. 105, pp. 6591–6610.
- Mehta A.J., Partheniades E., An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment, *J. Hydraul. Res.*, 1975, Vol. 13, pp. 361–381.
- Methodological guidelines for calculating the distribution of turbidity zones during dredging and dumping in the Navy. Moscow: the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2003, 80 p., [In Russian].
- Oil and the environment of the Kaliningrad region, Vol. II: The sea, ed. V.V. Sivkova, Yu.S. Kajoian, O.E. Pichuzhkina, V.N. Feldman, Kaliningrad: Terra Baltica, 2012, 576 p., [In Russian].
- Poddubnyi S.A., Podgornyi K.A., Use of a two-dimensional mathematical model for studying the thermal regime of the Rybinsk Reservoir, Proceedings of the VII Conference “Dynamics and Thermal of Rivers, Reservoirs and the Coastal Zone of the Seas” (Moscow, November 23–25, 2009) – Moscow: PFUR, 2009, pp. 216–224, [In Russian].
- Podgornyi K.A., Mathematical modeling of spatial-temporal dynamics of current fields in the Neva Bay, the Gulf of Finland. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference (school) on Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas. Baltiysk (Kaliningrad Oblast), 26–30 June 2010 / Ed. by B. Chubarenko, Kaliningrad: Terra Baltica, 2010, pp. 225–231.
- Podgornyi K.A., Mathematical modeling of transformation of biogenic elements substances in ecosystems of non-stratified reservoirs, Dissirtation of candidate of phys.-mathem. sciences: 03.01.02, 25.00.28, Moscow, 2012, 488 p., [In Russian].
- Podgornyi K.A., Modeling of the thermal regime of the Rybinsk Reservoir, Materials of the V International Scientific Conference “Theoretical and Applied Aspects of Modern Limnology” (Minsk, November 10–13, 2009), Minsk: Belarus State University, 2009a, pp. 90–93, [In Russian].
- Podgornyi K.A., Simulation of the space-temporal dynamics of water temperature fields in the Neva Bay of the Gulf of Finland. Proceedings of the VII Conference “Dynamics and Thermal of Rivers, Reservoirs and the Coastal Zone of the Seas” (Moscow, November 23–25, 2009), Moscow: RUDN, 2009b, pp. 207–215.
- Podgornyi K.A., Leonov A.V., Modeling of the processes of distribution of suspended matter in marine coastal areas: 1. Description of the SM-model, *Journal of Oceanological Research*, 2017, Vol. 45, No. 1, pp. 109–141, DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).10.
- Podgornyi K.A., Poddubnyi S.A., Modeling of the formation and intra-annual variability of the

flow structure in the estuarine zone of the Rybinsk Reservoir, Proceedings of the V International Scientific Conference “Theoretical and Applied Aspects of Contemporary Limnology” (Minsk. November 10–13. 2009), Minsk: Belarus State University, 2009, pp. 97–100, [In Russian].

*Podgornyi K.A., Poddubnyi S.A.*, Use of the system of equations of the theory of shallow water for the modeling of currents in the Rybinsk Reservoir. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (Perm'. May 24–26. 2005), Perm': Perm' University, 2005, pp. 62–66, [In Russian].

Shore protection manual, U.S. Army engineer waterways experimental station, Coastal engineering research centre, V. I, 4<sup>th</sup> edition, PO Box 631, Vicksburg, Mississippi 39180, 1984, 652 p.

*Stanev E.V., Dobrynin M., Pleskachevsky A., Grayek S., et al.*, Bed shear stress in the southern North Sea as an important driver for suspended sediment dynamics, *Ocean Dynamics*, 2009, Vol. 59, pp. 183–194.

*Ziegler C.K., Nisbet B.S.*, Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir, *J. Hydraul. Eng.*, 1995, Vol. 121, pp. 773–781.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В МОРСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ: 2. ТЕСТИРОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВВ-МОДЕЛИ

**К. А. Подгорный<sup>1</sup>, А. В. Леонов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Атлантический НИИ рыбного хозяйства и океанографии,  
236000, г. Калининград, ул. Дм. Донского, д. 5,  
e-mail: [kapborok@mail.ru](mailto:kapborok@mail.ru)*

<sup>2</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [leonov@ocean.ru](mailto:leonov@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 05.09.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Показано применение разработанной модели, описывающей последствия дноуглубительных работ в прибрежных акваториях (формирование в воде пятна мутности и распространения взвешенного вещества по акватории), а также вычисляющей значения ряда параметров, характеризующих условия перераспределения взвешенного вещества в толще воды и на поверхности дна. К таким параметрам относятся продолжительность присутствия в воде пятна мутности, изменения и распределения концентрации взвешенного вещества внутри такого пятна и накопления потерь взвешенного вещества на дне за весь период работ. Эти параметры входят в перечень характеристик, на основе которых оценивается ущерб биоресурсам (например, бентосным организмам) за счет нарушений естественных условий их обитания после завершения работ по байпасингу.

**Ключевые слова:** байпасинг; модель распространения взвешенного вещества; учитываемые природные факторы (ветер, морские течения, температура и соленость морской воды, свойства песчаных донных отложений); технологические данные проведения дноуглубительных работ; расчеты потерь грунта, условия образования взвешенного вещества, его концентрация в воде, аккумуляция на дне

### Литература

*Афанасьев С.В., Рянжин С.В.* Численное моделирование горизонтальной турбулентной диффузии в мелком озере // *Вод. ресурсы*. 1986. Т. 13. № 1. С. 87–94.

Методические указания по расчету распространения зон мутности при дноуглублении и дампинге на акваториях ВМФ. М.: МО РФ, 2003. 80 с.

- Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. II: Море / под ред. В.В. Сивкова, Ю.С. Каджояна, О.Е. Пичужкиной, В.Н. Фельдмана. Калининград: Terra Baltica, 2012. 576 с.
- Подгорный К.А.* Моделирование термического режима Рыбинского водохранилища // *Материалы V Международной научной конференции «Теоретические и прикладные аспекты современной лимнологии»* (г. Минск, 10–13 ноября 2009 г.). Минск: БГУ, 2009а. С. 90–93.
- Подгорный К.А.* Моделирование пространственно-временной динамики полей температуры воды в Невской губе Финского залива // *Труды VII конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей»* (г. Москва, 23–25 ноября 2009 г.). М.: РУДН, 2009б. С. 207–215.
- Подгорный К.А.* Математическое моделирование трансформации соединений биогенных элементов в экосистемах нестратифицированных водоемов. Дис... канд. физ.-мат. наук: 03.01.02, 25.00.28. М., 2012. 488 с.
- Подгорный К.А., Леонов А.В.* Моделирование процессов распространения взвешенного вещества в морских прибрежных акваториях. I. Описание модели // *Океанологические исследования*. 2017. Т. 45. № 1. С. 109–141. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).10.
- Подгорный К.А., Поддубный С.А.* Использование системы уравнений теории мелкой воды для моделирования течений в Рыбинском водохранилище // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции* (г. Пермь, 24–26 мая 2005 г.). Пермь: Перм. ун-т, 2005. С. 62–66.
- Подгорный К.А., Поддубный С.А.* Моделирование формирования и внутрigoдовой изменчивости структуры течений в устьевой зоне Рыбинского водохранилища // *Материалы V Международной научной конференции «Теоретические и прикладные аспекты современной лимнологии»* (г. Минск, 10–13 ноября 2009 г.). Минск: БГУ, 2009. С. 97–100.
- Поддубный С.А., Подгорный К.А.* Использование двумерной математической модели для изучения термического режима Рыбинского водохранилища // *Труды VII конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей»* (г. Москва, 23–25 ноября 2009 г.). М.: РУДН, 2009. С. 216–224.
- Chao X., Jia Y., Shields Jr. F.D., Wang S.S.Y., et al.* Three-dimensional modeling of cohesive sediment transport and wind wave impact in a shallow oxbow lake // *Adv. Water Res.* 2008. Vol. 31. P. 1004–1014.
- Hamilton D.P., Mitchell S.F.* An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes // *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 317. P. 209–220.
- Lou J., Schwab D.J., Beletsky D., Hawley N.* A model of sediment resuspension and transport dynamics in southern Lake Michigan // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 6591–6610.
- Mehta A.J., Partheniades E.* An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment // *J. Hydraul. Res.* 1975. Vol. 13. P. 361–381.
- Podgornyj K.A.* Mathematical modeling of spatial-temporal dynamics of current fields in the Neva Bay, the Gulf of Finland // *Proceedings of the 2nd International Conference (school) on Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas*. Baltiysk (Kaliningrad Oblast), 26–30 June 2010 / Ed. by B. Chubarenko. Kaliningrad: Terra Baltica, 2010. P. 225–231.
- Shore protection manual. U.S. Army engineer waterways experimental station. Coastal engineering research centre. Vol. I, 4th edition. PO Box 631, Vicksburg, Mississippi 39180. 1984. 652 p.
- Stanev E.V., Dobrynin M., Pleskachevsky A., Grayek S., et al.* Bed shear stress in the southern North Sea as an important driver for suspended sediment dynamics // *Ocean Dynamics*. 2009. Vol. 59. P. 183–194.
- Ziegler C.K., Nisbet B.S.* Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir // *J. Hydraul. Eng.* 1995. Vol. 121. P. 773–781.



## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ВРЕМЕННОЙ ПОГРЕШНОСТИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ СИГНАЛОВ

А.В. Носов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [a\\_v\\_nos@mail.ru](mailto:a_v_nos@mail.ru)  
Статья поступила в редакцию 14.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017*

Приведен алгоритм расчета точного времени событий, зафиксированных регистратором, использующим термокомпенсированный кварц. Представлены материалы, подтверждающие точность измерения времени  $10^{-9}$ .

**Ключевые слова:** Контроллер, термокомпенсированный кварц, автономный регистратор

Как было показано в предыдущих работах, регистраторы автономных донных станций, обеспечивающие высокоточную временную привязку данных к единой шкале времени без доступа к спутниковой навигации в ходе измерений и при соблюдении требований к минимальному энергопотреблению используют метод термокомпенсации (Носов и др., 2017; Левченко и др., 2004; Левченко и др., 2007). Однако опыт этих публикаций показал, что до сих пор возникают сомнения в том, что данный метод обеспечивает заявленную точность. Данная работа посвящена более детальному изложению алгоритма временной привязки и обсуждению полученных результатов.

Основой для временной привязки автономного регистратора данных являлась сборка из двух кварцев. Один из них тактировал контроллер регистратора, его резонансная частота мало зависела от температуры. Частота этого кварца  $f$ , использовавшегося в регистраторах, была близка к 7000000 Гц. Другой кварц – термозависимый, его частота  $F$  была близка к 32000 Гц. Конструктивно оба кварца были склеены между собой и располагались в миниатюрном металлическом корпусе типа микросхемы, который обеспечивал равенство их температур. Неотъемлемой частью этой конструкции являлась калибровочная таблица, содержащая данные о соответствии частот кварцев при разных температурах в диапазоне рабочих условий регистратора (от 0 до 50 град. Цельсия). Пример выборки из такой таблицы приведен в табл. 1.

Для временной привязки измерений использовались два счетчика контроллера регистратора. Главный счетчик – аппаратно-программный, состоял как из собственно счетчика, так и нескольких дополнительных байтов. Главный счетчик предназначен для подсчета всех тактов быстрого кварца в течение всего процесса регистрации, количество дополнительных байтов определялось необходимой емкостью счетчика (максимальной необходимой длительностью сеанса работы регистратора). Другой счетчик, медленный, подсчитывал количество тактов термозависимого кварца и предназначался для формирования временных интервалов (около

10 с.), использовавшихся для учета температурного ухода частоты главного кварца. Медленный счетчик подсчитывал фиксированное количество периодов термозависимого кварца (320000), по совпадению вырабатывал прерывание и перезапускался. Таким образом, формировалась последовательность импульсов с периодом следования около 10 с.

Таблица 1

Номер пары	F, Гц	f, Гц
1	32695	6999937.374
2	32696	6999937.791
3	32697	6999938.218
–	–	–
50	32744	6999960.853
51	32745	6999961.204
52	32746	6999961.543
–	–	–
102	32796	6999951.410
103	32797	6999950.458
104	32798	6999949.468

Для каждого условно 10-секундного интервала подсчитывалось количество попавших в него тактов главного кварца. Подсчет проводился методом захвата (без остановки подсчета) значений регистров главного счетчика. Эти данные, термические, использовались следующим образом. Предварительно, на основании данных табл. 1 составлялась таблица ожидаемого количества тактов главного кварца  $N$ , которые попадут в условно 10-секундный интервал при данной частоте термозависимого кварца. Пример выборки из такой таблицы представлен в табл. 2.

Таблица 2

Номер пары	N	F, Гц
1	68511139	6999937.374
2	68509300	6999937.791
3	68507209	6999938.218
–	–	–
50	68409097	6999960.853
51	68407011	6999961.204
52	68404926	6999961.543
–	–	–
102	68300538	6999951.410
103	68298446	6999950.458
104	68296354	6999949.468

Далее методом кусочно-линейной интерполяции для любого числа  $N$  вычислялась реальная физическая частота главного кварца. Зная частоту главного кварца и количество его периодов, попавших в текущий термический интервал, определялась его истинная длительность.

Примечательно то обстоятельство, что на диапазон изменчивости частоты главного кварца около 10 Гц приходится диапазон измеряемого параметра около 200000 единиц. Если бы калибровочные таблицы кварцев содержали информацию о температурах при измерении частот, можно было бы на их основе изготовить термометр с точностью выше 0.001 град.

Помимо счетчиков, в процессе временной привязки существенно использовался внешний эталон единой шкалы времени. В нашем случае им служил приемник GPS, имеющий в качестве выходных сигналов PPS и COM-порт. PPS служил для точной аппаратной привязки контроллера к единой шкале времени, а COM-порт – для считывания информации о моменте времени, соответствующем фронту сигнала PPS.

При включении питания регистратора счетчики начинали подсчитывать соответствующие импульсы. Перед переводом регистратора в режим автономной работы производилась его временная калибровка. Суть калибровки состояла в захвате состояния главного счетчика по фронту ближайшего пришедшего импульса PPS и фиксации соответствующего ему значения времени. В ходе регистрации в каждый момент возникновения прерывания от медленного счетчика (температурно зависимого) проводился захват состояния главного счетчика. Важным для обеспечения точности являлось то обстоятельство, что считывание состояния главного счетчика проводится именно путем захвата, тем самым учитывался каждый такт главного кварца, и если он не попал в предыдущий температурный интервал – он был учтен в последующем. После вывода регистратора из автономного режима также производилась его временная калибровка.

Для привязки измерений к единой шкале времени после завершения регистрации проводятся следующие действия. Для каждого 10-секундного интервала между прерываниями от температурно зависимого кварца на основании табл. 2 вычислялась его точная длительность согласно единой шкале времени. Вычисления производятся с максимальной доступной точностью (в Дельфи – 20 десятичных разрядов). Для крайних неполных временных интервалов (момент калибровки не синхронизировался с регистрацией температурных данных) оценка частоты главного кварца бралась из ближайших полных температурных интервалов. Длительности всех температурных временных интервалов суммировались, и результат сравнивался с временем финальной временной калибровки. Разность равномерно растягивалась по всему времени регистрации.

Таким образом, каждый момент прерывания от температурного кварца оказывается привязан к единой шкале времени. Для привязки ко времени какого-либо события достаточно было зафиксировать в момент его появления состояние главного счетчика. Используя привязку ко времени предшествующего температурного прерывания и точную частоту главного кварца на текущем температурном интервале, можно было оценить точное время возникновения события.

Следует отметить, что данный метод временной привязки записей не требует высокой точности предварительной калибровки и автоматически компенсирует эф-

фekt старения кварца, если при старении температурная зависимость его частоты не меняется. В то же время важно учитывать, что после перекачки зарегистрированных данных из регистратора в компьютер индекс получаемого массива нельзя рассматривать как меру времени, скорее он является лишь порядковым номером элемента массива двухкомпонентных векторов, одна из компонент которых является целочисленной – результат оцифровки входного сигнала, а вторая – действительной, как результат расчета времени на базе данных калибровки.

Для проверки точности описанного способа термокомпенсации был поставлен эксперимент, в ходе которого с помощью сейсморегистратора принимались и записывались короткие импульсы, синхронизированные с источником точного времени (GPS приемник), следовавшие с интервалом примерно 50 секунд. Моменты генерации фронтов этих импульсов совпадали с фронтами сигналов PPS спутникового приемника, соответствующие аннотации сохранялись в специальном электронном журнале. Первая запись была сделана в течение примерно 15 суток, вторая – в течение нескольких часов. Первая запись была начата в лаборатории при комнатной температуре, затем регистратор был перемещен в провизионную кладовую, температура воздуха в которой была близка к 2°C. Затем регистратор на несколько суток был возвращен в лабораторию и соединен с источником импульсов подрыва пневмопушки. По окончании регистрации сигналов регистратор вновь был перемещен к кладовую и окончательно вернулся в лабораторию в конце сеанса регистрации для финальной временной калибровки. На рис. 1 представлены зафиксированные регистратором данные о температуре. По горизонтальной оси отложено время в секундах, по вертикальной – количество импульсов тактового кварца (7000000 Гц), попавших в 10-секундный временной интервал. Не следует сопоставлять рис. 1 с данными табл. 2, поскольку они получены для разных кварцев.

На рис. 2 представлена аналогичная зависимость, полученная в ходе второй записи. Относительно высокочастотные колебания на графике второго рисунка связаны с периодическим включением лабораторного кондиционера.

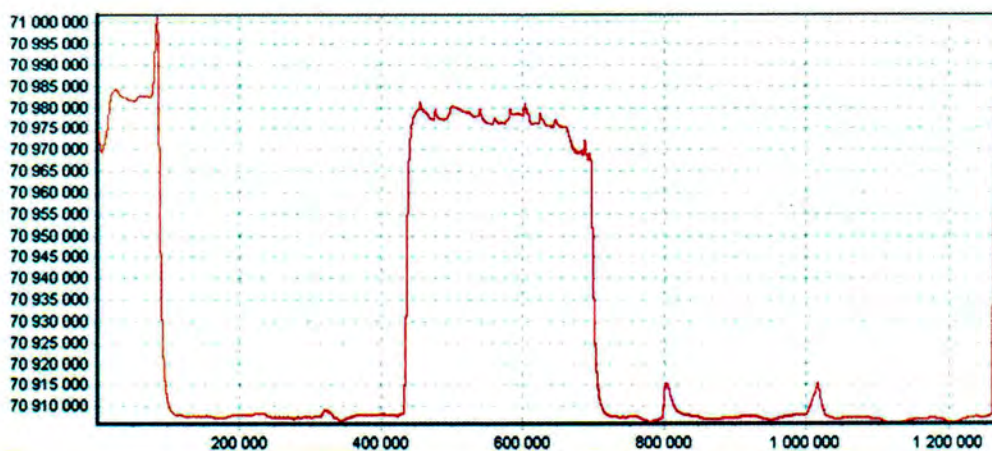


Рис. 1. Зависимость частоты главного кварца от времени в течение первой записи.

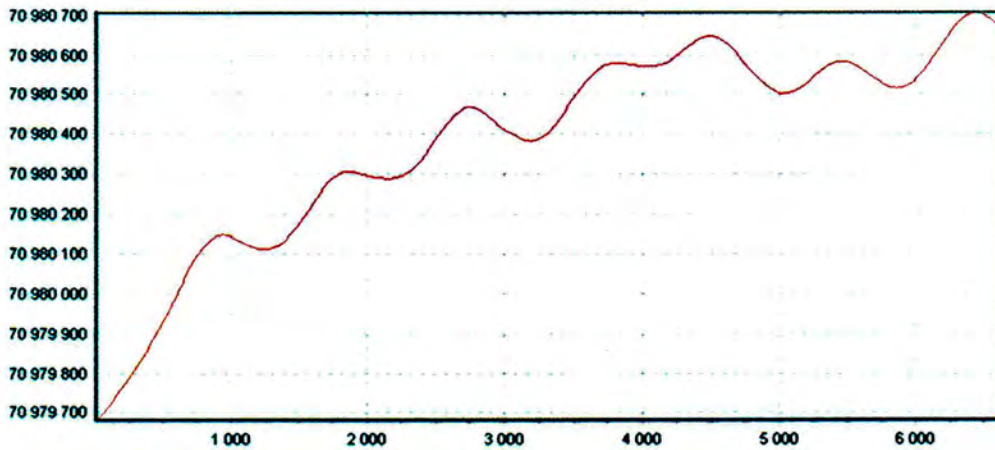


Рис. 2. Зависимость частоты главного кварца от времени в течение второй записи.

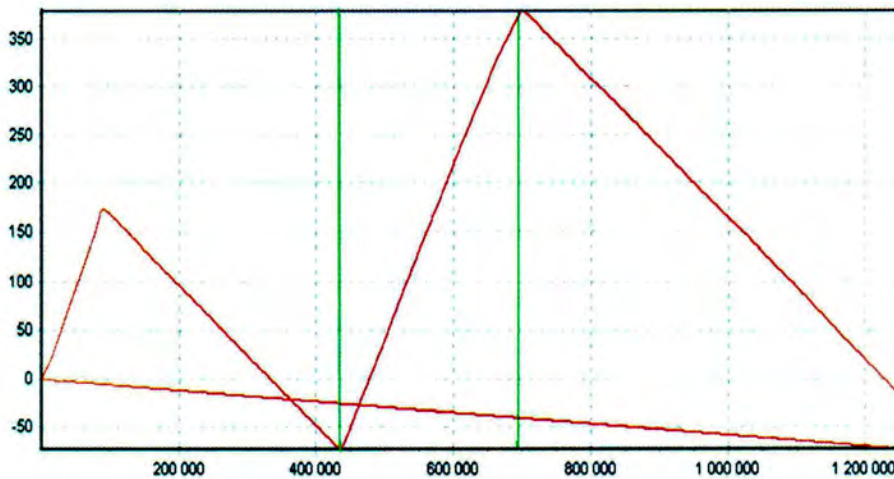


Рис. 3. Временные поправки для первой записи, миллисекунды.

На рис. 3 приведен результат расчета временных поправок, полученный с помощью данного метода термокомпенсации. По горизонтальной оси отложено время в секундах, по вертикальной – поправки в миллисекундах. Прямая наклонная линия – уход внутренних часов регистратора. Рис. 3 демонстрирует тот факт, что при отсутствии компенсации зарегистрированное регистратором время отличалось бы от времени по единой шкале на величину порядка 400 мс. На рис. 4 представлены аналогичные данные второй записи. Поскольку вторая запись была короткая и проводилась в относительно стабильных условиях, вводимые временные поправки не превышают 0.04 мс.

На рис. 5 представлены графики сигналов для двух экспериментов. Графики (трассы) составлялись на основе выборки из общей непрерывной записи того участка сигнала, который начинался в момент генерации импульса, зарегистрированный в журнале. На рис. 5 начало выборки соответствует нижней границе рисунка. Длительность выборки составляла 100 мс.



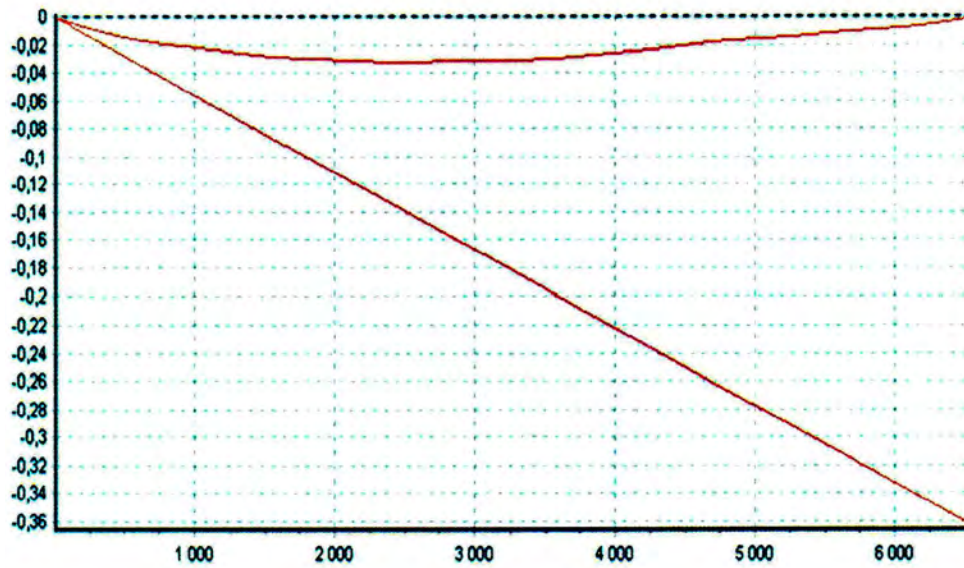


Рис. 4. Временные поправки для второй записи, миллисекунды.

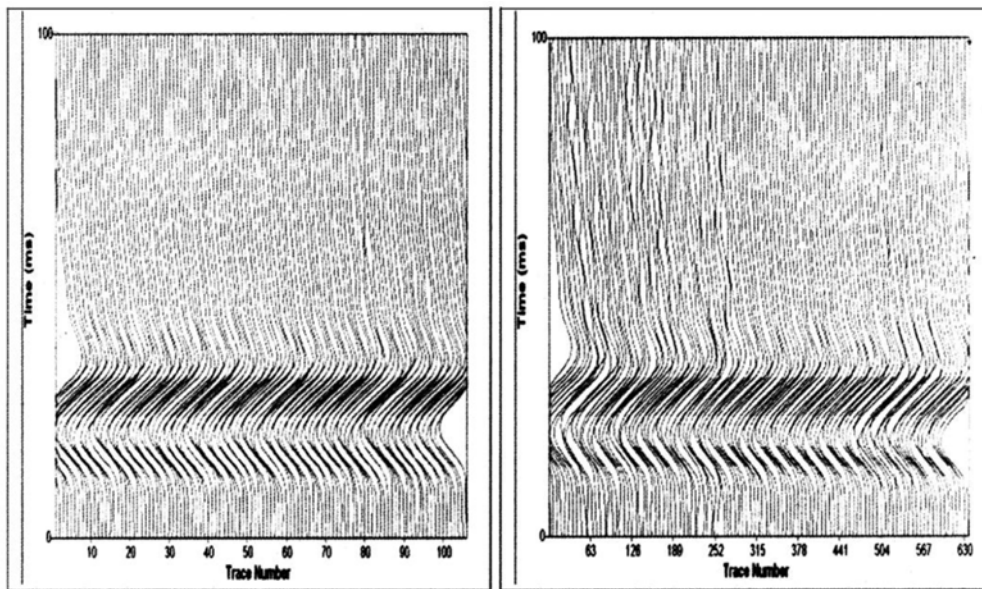


Рис. 5. Сравнение двух записей. Графики сигналов подрыва пушки.

Слева – полученные для сравнения без перемещения из лаборатории как опорные. Справа – результат 15-суточного эксперимента. Следует отметить дополнительно, что для обеих записей информация о точном времени от спутникового приемника подавалась к контроллеру регистратора только в начале и конце записи, в остальное время регистратор использовал сигналы спутникового приемника только через аналоговые входы. Правая картинка составлена с использованием скорректированного по времени сигнала; в противном случае, как следует из рис. 3, передний фронт совокупности графиков импульсов растянулся бы по вертикали на 400 мс.

Сигналы сглаженные, поскольку подверглись фильтрации. Полоса пропускания фильтра – от 5 до 125 Гц. По горизонтальной оси отложены номера трасс, по вертикальной – время в мс. Каждая трасса извлечена из общей записи с учетом временных поправок на основании зарегистрированного независимым устройством точного момента генерации импульса согласно единой шкале времени. Оценивая стабильность фронта сигнала величиной около 1 мс, имеем оценку эквивалентной временной точности измерения в  $10^{-9}$ .

Работа выполнена по теме № 0149-2018-0010 «Технологии инструментальных океанологических наблюдений для исследования физических полей, подводных объектов и экологии в гидросфере: разработка методов и технических средств многопараметрического сканирования водной толщи, дна и подводных объектов автономными и привязными зондами и профилографами».

### Литература

- Левченко Д.Г., Носов А.В., Парамонов А.А., Симонов В.Н.* Устройство и способ (варианты) хронирования информации автономной информационно-измерительной системы: Патент № 2277298 РФ // 22.09.2004.
- Левченко Д.Г., Носов А.В., Парамонов А.А., Симонов В.Н.* Устройство хронирования информации автономной информационно-измерительной системы // Научное приборостроение. 2007. Т. 17. № 3. С. 88–94.
- Носов А.В., Руссак Ю.С., Тихонова Н.Ф., Юрицын В.В.* Опыт использования метода термокомпенсации для автономных регистраторов сигналов. // Сборник трудов всероссийской конференции МСОИ–2017. – Т. 2, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН Москва, 2017. – С. 49–54.

### SOME SPECIAL ASPECT OF TIME ERROR TERMOCOMPENSATION METHOD USE FOR AUTONOMOUS SIGNAL RECORDERS

**A.V. Nosov<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia,  
e-mail: [a\\_v\\_nos@mail.ru](mailto:a_v_nos@mail.ru)*

Submitted 14.10.2017, accepted 25.12.2017

Some previous and new additional results are presented concerning accurate of time correction of data received by using thermo compensated quarts. Materials confirmed relative accuracy of data registration up to  $10^{-9}$ .

**Keywords:** Controller, termo quarts, autonomous registrator.

## References

- Levchenko D.G., Nosov A.V., Paramonov A.A., Simonov V.N.*, Ustrojstvo i sposob (varianty) hronirovanija informacii avtonomnoj informacionno-izmeritel'noj sistemy (Mean and method of time attachment of information for autonomous recorder.), Patent No. 2277298 RF, 22.09.2004.
- Levchenko D.G., Nosov A.V., Paramonov A.A., Simonov V.N.*, Ustrojstvo hronirovanija informacii avtonomnoj informacionno-izmeritel'noj sistemy. (Equipment for time attachment of autonomous recorder), *Nauchnoe priborostroenie*, 2007, Vol. 17, No.3, pp. 88–94.
- Nosov A.V., Russak Ju.S., Tihonova N.F., Juricyn V.V.*, Opyt ispol'zovanija metoda termokompensacii dlja avtonomnyh registratorov signalov (Experience of applyement of thermo compensation method for autonomous signal registrators), Sbornik trudov vsrossijskoj konferencii MSOI–2017, Vol. 2, Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, Moskva, 2017, pp. 49–54.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

С.Г. Поярко<sup>1</sup>, Н.А. Римский-Корсаков<sup>1,2</sup>, М.В. Флинт<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [nrk@ocean.ru](mailto:nrk@ocean.ru), [m\\_flint@ocean.ru](mailto:m_flint@ocean.ru)

<sup>2</sup>Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.Баумана,

Москва 105005, Russiae-mail: [nrk@ocean.ru](mailto:nrk@ocean.ru) (<mailto:nrk@ocean.ru>)

Статья поступила в редакцию 10.10.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Статья посвящена анализу средств и методов подводных исследований, которые использовались для изучения экологии районов Карского моря в местах захоронения твердых радиоактивных отходов (ТРО), а также для контроля состояния радиационно-опасных объектов составляющих эти захоронения. Рассмотрены технические и методические решения задач поиска подводных объектов и исследования морфологии рельефа дна с использованием гидролокационных методов. Важным этапом процесса исследования подводных радиационно-опасных объектов является их идентификация и определение соответствия архивным данным. Эти операции выполняются с использованием подводных видеосистем, позволяющих визуально определить состояние подводных объектов и защитных барьеров, отделяющих источники радиоактивности от окружающей среды. Состояние этих барьеров оценивается также по уровням радиоактивности снаружи объектов и на примыкающих участках дна с использованием подводных гамма-спектрометров. Гидролокаторы, видеосистемы и гамма-спектрометры доставляются к объектам исследования с помощью подводных носителей аппаратов. К ним относятся буксируемые, телеуправляемые и автономные необитаемые подводные аппараты (БНПА, ТНПА и АНПА). БНПА и АНПА используются в основном для работ на заданных маршрутах с гидролокационной или видеоаппаратурой. ТНПА используются для осмотра объектов, целенаправленных визуально контролируемых гамма-спектрометрических измерений и отбора образцов. Эти технологии были отработаны в процессе морских исследований районов захоронений ТРО в Карском море, позволили получить современные данные о состоянии окружающей среды и затопленных объектов и подтвердили правильность выбранной методологии исследований.

**Ключевые слова:** Новая Земля, Карское море, радиоактивные отходы, захоронения, гидролокатор, видеосистема, гамма-спектрометр, подводный аппарат, маршрутная съемка, целенаправленные наблюдения

Особенности исследований окружающей среды в Карском море связаны с наличием здесь захоронений радиоактивных аварийных объектов и отходов эксплуатации морских ядерных установок. Составляющей исследований является контроль состояния защитных барьеров подводных объектов – элементов захоронений, которые отделяют радиоактивные материалы от водной среды и донного грунта. Контроль состояния объектов включает их поиск или уточнение местоположения исходя из архивных данных о затоплении, идентификацию и оценку состояния механической конструкции, а также целенаправленные измерения радиоактивности самих объек-

тов, и окружающей природной среды. Более углубленные исследования, позволяющие прогнозировать состояние экологии в условиях временной трансформации радиоактивных объектов, включают изучение процессов переноса водных масс и донных отложений в районах захоронений. Для решения задач контроля и прогноза применяются инструментальные методы: гидролокация бокового обзора и акустическое профилирование, подводное телевидение, гамма-спектрометрия и гидрофизическое зондирование. При этом используются современные средства доставки приборов к объектам исследования: подводные телеуправляемые (ТНПА), автономные (АНПА) и буксируемые (БНПА) необитаемые аппараты, донные станции и кабельные зонды. Идентификация природных объектов производится с помощью традиционных средств отбора проб, в том числе гравитационных трубчатых отборников системы Нейместо, позволяющих отбирать граничащие образцы воды и грунта, в которых сосредоточены загрязнители морской среды.

Институт океанологии им.П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) ведет систематическую экспедиционную работу в Российской Арктике (Флинт и др., 2016; Флинт и др., 2008), направленную на изучение региональных экосистем. Неотъемлемой частью этих исследований является исследование состояния окружающей среды Карского моря в условиях присутствия массовых захоронений радиоактивных отходов.

С началом широкого развития атомной энергетики в конце 40-х годов остро встала проблема утилизации радиоактивных отходов (РАО). Одним из вариантов утилизации, получившим довольно широкое распространение, стал сброс РАО в открытое море.

В России необходимость захоронения РАО в море связана, в основном, с деятельностью Военно-Морского Флота и Мурманского Морского пароходства, имеющих атомный флот. Для захоронений твердых радиоактивных отходов (ТРО) использовались районы Карского моря (заливы Течений, Цивольки, Абросимова, Степового, Ога, Благополучия, Седова, а также глубоководный район Новоземельской впадины).

Объекты захоронений представляют собой: а) плавсредства, имеющие на борту твердые радиоактивные отходы, включая части реакторных установок и другое загрязненное оборудование разных уровней активности; б) крупногабаритные объекты, такие как реакторные отсеки атомных подводных лодках (АПЛ), которые затоплялись отдельно или внутри барж, лихтеров и танкеров; в) крупные объекты, такие как циркуляционные насосы, генераторы и другие части ядерных установок, которые затоплялись без упаковки; г) загрязненные пленочные покрытия, инструменты, средства индивидуальной защиты, спецодежда, арматура, трубопроводы, коробки фильтров активности, насосы, парогенераторы и т.д., упакованные в металлические и железобетонные контейнеры в основном размером 1×1.5 м.

По данным, изложенным в «Белой книге-2000» (Айбулатов, 2000), в Карском море затоплено 6508 контейнеров с ТРО, 13 реакторов АПЛ и одна реакторная сборка атомного ледокола «Ленин».



Длительное нахождение перечисленных объектов в морской коррозионно-агрессивной среде может привести к частичному разрушению металлических оболочек. Таким образом, затопленные в Карском море объекты являются потенциально опасными и представляют собой очаги возможного радиоактивного загрязнения. В этой связи проблема контроля состояния затопленных объектов с радиоактивными отходами в Карском море является актуальной.

В России учет подводных потенциально опасных объектов (ППО) ведет МЧС и начиная с 2002 г. регулярно заказывает ИО РАН проведение исследований, связанных с уточнением местоположения и контролем состояния ППО, в том числе в Карском море (Флинт и др., 2016; Флинт и др., 2008; Римский-Корсаков и др., 2008; Вялышев и др., 2015; Вялышев и др., 2016). Тем не менее, в акватории Карского моря до настоящего времени остаются необследованными еще ряд важных районов, а архивные данные о местоположении ряда объектов не подтверждены современными методами.

Процесс обследования районов возможного по архивным данным захоронения ППО включает: а) мезомасштабную поисковую съемку поверхности дна с использованием гидролокатора бокового обзора (ГБО); б) дообследование обнаруженных объектов с использованием ГБО с высоким пространственным разрешением; в) идентификацию объектов с использованием видеосистем подводных аппаратов различных классов и типов; г) измерения радиоактивности с использованием гамма-спектрометров в автономном режиме, с борта ТНПА, а также геохимическими методами.

Для мезомасштабной поисковой съемки в арктических экспедициях ИО РАН используется буксируемый ГБО «Мезоскан» (рис. 1) с глубиной погружения



Рис. 1. Буксируемый гидролокатор бокового обзора «Мезоскан».

2 км разработки ИО РАН (Римский-Корсаков и Сычев, 2007; Римский-Корсаков и Никитин, 2011). Рабочая частота гидролокатора составляет 78 кГц, максимальная полоса обзора – 1200 м. Разрешающая способность по дальности варьируется в зависимости от длительности зондирующего сигнала в диапазоне от 1 м до 20 см. Гидролокатор буксируется на коаксиальном трос-кабеле и может дополняться комбинированным гравитационно-гидродинамическим углубителем («решеткой»), эффективно работающим на скорости буксировки 4 узла. Для сбора, отображения, обработки и архивирования данных (изображений поверхности дна), получаемых с помощью гидролокатора, используются два пакета оригинальных программ для реального вре-

мени и для режима постобработки (ЭхоГраф и ВинРастр). На рис. 2 приведено гидролокационное изображение радиационно опасных объектов – баржи и группы контейнеров с ТРО, затопленных в заливе Абросимова, полученное с помощью ГБО «Мезоскан». Для детализированных исследований обнаруженных подводных объектов применяются высокочастотные ГБО, что позволяет в ряде случаев идентифицировать эти объекты дистанционно. В ИО РАН для этих целей используется буксируемый ГБО YellowFin канадской фирмы Imagenex model 872 с рабочей глубиной до 300 м и рабочими частотами 250, 300 и 600 кГц ([www.imagenex.com](http://www.imagenex.com)). На рис. 3 приведена фотография ГБО YellowFin, а на рис. 4 – гидролокационное изображение баржи, затопленной с грузом ТРО, полученное с его помощью.

Помимо буксируемых за судном ГБО для поиска и исследования подводных объектов, в том числе потенциально опасных^ используются гидролокаторы АНПА,

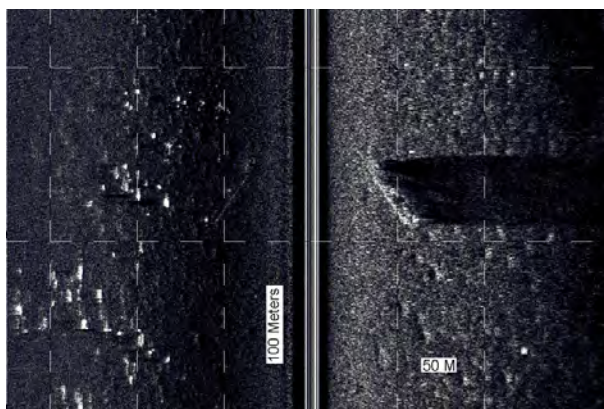


Рис. 2. Гидролокационное изображение дна, полученное с помощью ГБО «Мезоскан»: справа – баржа, а слева – россыпь контейнеров с ТРО, затопленных в заливе Абросимова.

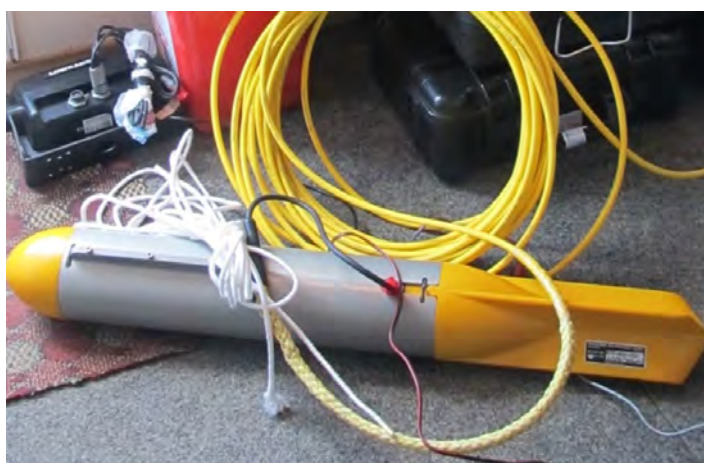


Рис. 3. Высокочастотный ГБО YellowFin.

которые по заданной программе способны вести планомерную по-галсовую съемку значительных площадей морского дна на предельных глубинах. Так при обследовании АПЛ К-27, затопленной в заливе Степового Новой Земли в 2013 году, в экспедиции ИО РАН использовался АНПА «Пилигрим» (рис. 5), созданный в Институте

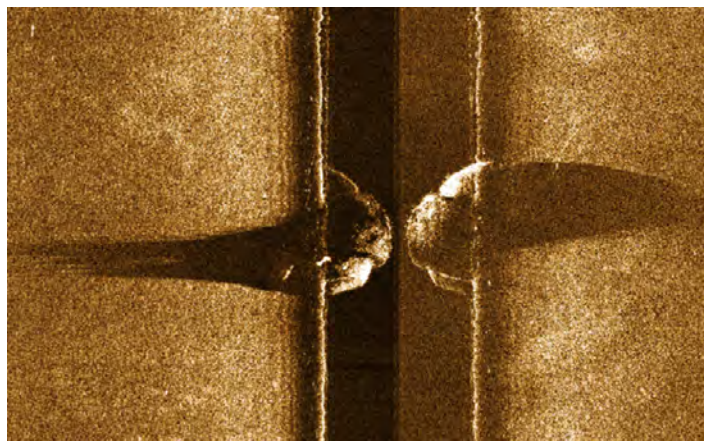


Рис. 4. Гидролокационное изображение реакторного отсека (РО) АПЛ, полученное с помощью ГБО YellowFin в заливе Абросимова.

проблем морских технологий РАН (Войтов, 2015). Максимальная рабочая глубина аппарата – 3000 м, масса 300 – кг, автономность – 20 час. Аппарат оборудован двухчастотным ГБО (80/485 кГц), акустическим профилографом, STD – зондом и цифровой фото-видео системой с разрешением 1392×1040 точек.



Рис. 5. Автономный необитаемый подводный аппарат «Пилигрим».

Аппарат имеет интегральную навигационную систему, включающую автономную компоненту, что обеспечивает абсолютную точность подводного позиционирования 20 м. Связь с аппаратом осуществляется в надводном положении по радио, а под водой – с использованием гидроакустической системы телеметрии и телеуправления. Обследование АПЛ «К-27» проводилось с помощью высокочастотного (ВЧ) ГБО и включало также маршрутное фотографирование прилегающего дна. Были выполнены 3 обхода АПЛ с гидролокационной съемкой по прямоугольному маршруту на глубинах 14, 19 и 24 м и один обход с фотографированием дна с высоты 2 м (рис. 6).

Маршруты отстояли в плане на 45 м от носа, кормы и бортов АПЛ. После прохода одного продольного и одного поперечного галсов АНПА всплывал, уточ-



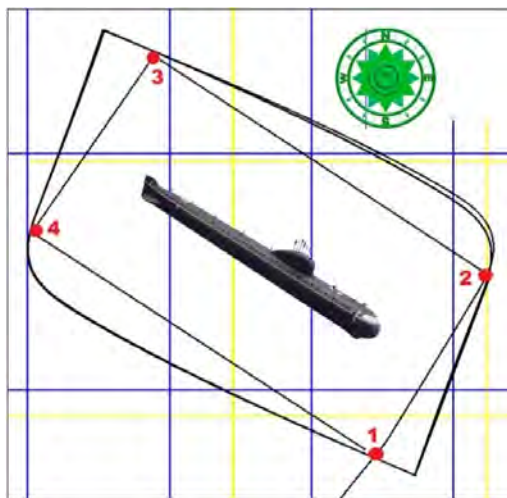


Рис. 6. Маршрут АНПА «Пилигрим» при обследовании АПЛ «К-27». Прямоугольник – запланированный маршрут. 1 и 3 – точки всплытия и коррекции маршрута.

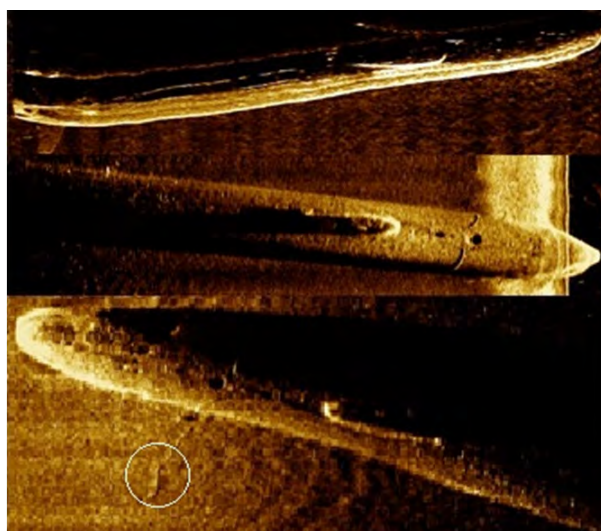


Рис. 7. Гидролокационные изображения АПЛ «К-27» полученные с помощью ВЧ ГБО АНПА «Пилигрим» в заливе Степового. Кругком обведен якорь АПЛ. Рядом видна цепь.

нял собственное местоположение по GPS и корректировал маршрут движения. Траектория движения АНПА с путевыми точками показана на рис. 5. Были получены гидролокационные изображения АПЛ с четырех ракурсов (рис. 7), якоря с якорной цепью и непрерывной серии фотографий (2383 кадра) донного грунта, прилегающего к АПЛ (рис. 8).

Довольно часто для идентификации, в первую очередь, крупных ППОО достаточным является сравнение их гидролокационных изображений с изображениями однотипных объектов, а также их сравнение с фотографиями этих объектов, полученными до затопления (Римский-Корсаков и др., 2016).

На рис. 9 приведена фотография реакторного отсека АПЛ из Интернет-ресурса (<http://avtonomka.org/kniga-vracha/1012>) перед затоплением. К отсеку с торцов

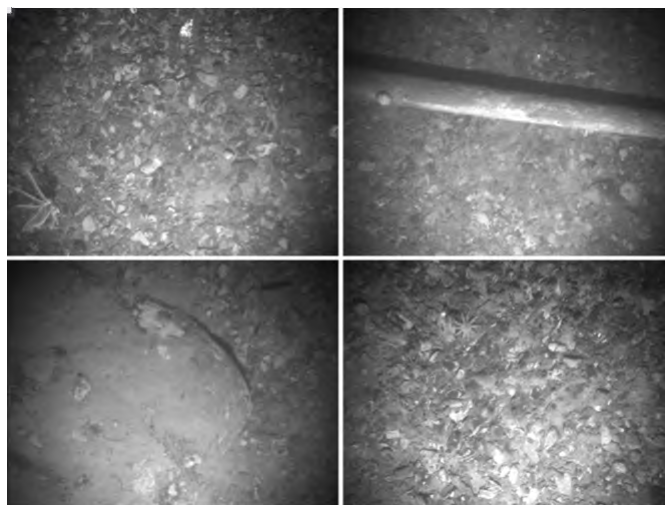


Рис. 8. Фотографии, полученные в ходе маршрутной съемки поверхности дна вокруг АПЛ «К-27».

приварены понтоны, что позволяет ему находиться на плаву и дает возможность транспортировки по воде путем буксировки. Для затопления отсека понтоны разгерметизировались. Их наличие придает такому подводному объекту характерный вид на гидролокационных изображениях, одно из которых приведено на рис. 4. На фотографии, приведенной на рис. 11, изображен пароход «Хосе Диас», который



Рис. 9. Вид реакторного отсека АПЛ проекта 658 со стороны кормового понтона наплаву перед затоплением.

использовался для транспортировки ТРО и был затоплен с грузом в Новоземельской впадине. Отличительной особенностью судна являются две мачты и дымовая труба, которые отчетливо распознаются по характерным теням на гидролокационном изображении на рис. 10. На рис. 12 слева представлено гидролокационное изображение участка дна в месте массового захоронения ТРО в контейнерах, а на рис. 12 представлены соответствующие кадры видеозаписей, сделанные с помощью ТНПА ГНОМ. На рис. 13 приведены типичные гидролокационные изображения



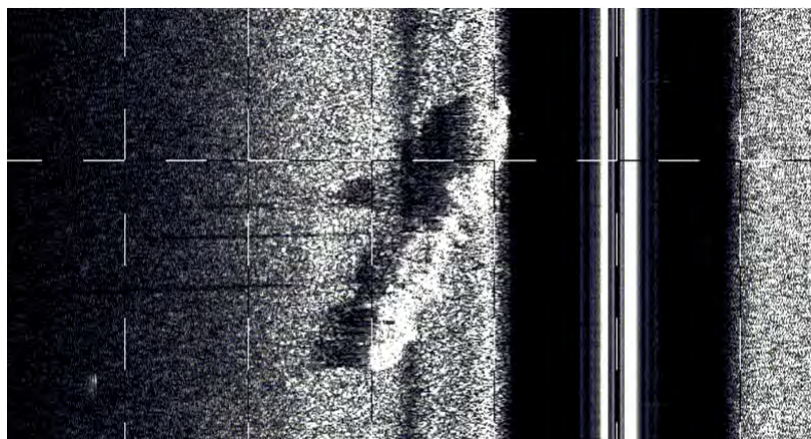


Рис. 10. Гидролокационное изображение судна п/х «Хосе Диас», затопленного с грузом ТРО в Новоземельской впадине (ГБО «Мезоскан», 78 кГц). Судно идентифицируется по четким теням от мачт со стрелами и дымовой трубы.



Рис. 11. Фотография парохода «Хосе Диас», впоследствии затопленного с грузом ТРО в Новоземельской впадине.



Рис. 12. Кадр видеозаписи контейнеров, составляющих захоронение ТРО.

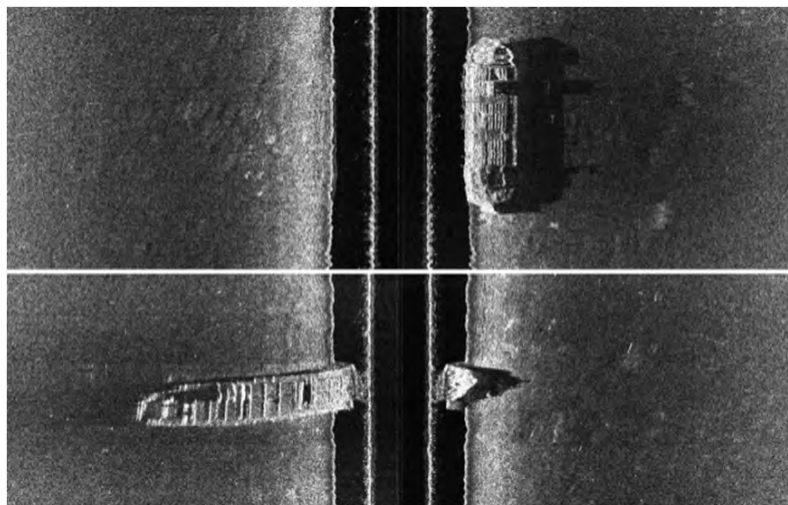


Рис. 13. Типичные гидролокационные изображения затопленных судов с ТРО.

лихтера и баржи, которые, как правило, использовались для транспортировки ТРО и впоследствии вместе с ними и затапливались.

Наиболее эффективным методом идентификации и контроля состояния конструкции подводных объектов является их визуальное наблюдение с помощью подводных телевизионных систем. Такие наблюдения могут производиться на маршрутах следования БНПА и АНПА, оборудованных видеосистемами, либо целенаправленно в процессе погружения ТНПА. Если представление видеоизображений подводных объектов с помощью видеосистем АНПА в реальном времени практически невозможно, то возможности БНПА в этой части в связи с развитием оптоволоконных технологий не ограничены.

Для маршрутных глубоководных видеонаблюдений в ИО РАН разработан БНПА «Видеомодуль», который уже на протяжении 3 лет, совершенствуясь, эксплуатируется в Арктических экспедициях. Аппарат представляет собой пространственную раму из нержавеющей стали, внутри которой на кронштейнах закреплены прочные корпуса с электронным оборудованием, элементами питания и видеокамерами, а также установлены гидрофизический зонд SBE и подводный гамма-спектрометр РЭМ-26. Корпуса соединены между собой подводными кабелями с герметичными электрическими разъемами. Рама имеет узел регулируемой подвески БНПА к кабель-тросу и 12 грузов для его устойчивого заглубления и балансировки по дифференту. Фотография аппарата приведена на рис. 14, основные технические характеристики – в таблице.

В 2015–2017 годах с помощью БНПА «Видеомодуль» были получены видеоизображения дна в местах подводной разгрузки углеводородов в море Лаптевых, изображения газовых пузырьков, бактериальных матов, карбонатных корок и эндемичных животных, были получены уникальные видеоматериалы с изображениями донных животных в заливах Новой Земли Карского моря, а также техногенных объектов – плавсредств с грузом ТРО, затопленных в заливах и в Новоземельской впадине.



Рис. 14. БНПА «Видеомодуль».

№	Характеристика	Значение
1	Масса, кг	550
2	Габариты, м	2.1 x 1.0 x 0.7
3	Максимальная рабочая глубина, м	6000
4	Тип буксирной линии	Кабель-трос КГ1х3Е-70-60-3
5	Информационный канал связи	Оптическое волокно (3)
6	Информационный интерфейс	RS232
7	Энергосистема	Бортовая аккумуляторная батарея
8	Напряжение/емкость батареи В/Ачас	12/50
9	Автономность не менее, час	2
10	Телекамера 1	Цв. цифровая IP HD BeWard BD3270Z
11	Телекамера 2	Цв. аналоговая Pal EC-007A
12	Телекамера 3	Цв. комбинированная HD XiaomiYi
13	Источник заливающего света (ИЗС)	Светодиодная матрица Epistar XY-J45
14	Максимальная электрическая мощность ИЗС, Вт	180 = (30*6шт)
15	STD-зонд	SBE 19plus
16	Датчик глубомера	MLH 08KPSB01A Honeywell
17	Гамма-спектрометр	РЭМ-26
18	Система оптического масштабирования	M65051 US-Lasers

Первоначально основным методом исследований экологии Карского моря, в том числе заливов Новой Земли, в условиях массовых затоплений радиоактивных отходов был отбор проб и анализ придонной воды и донного грунта по заранее определенной сетке. Этот метод позволил оценить средний уровень концентрации техногенных радионуклидов в осадочных породах этого региона. Вместе с тем, этот метод не позволял получить достаточной информации о состоянии непосредственно самих затопленных объектов. В тех случаях, когда эта информация необходима, оптимальным является прямое измерение уровней гамма-излучения с помощью подводной аппаратуры радиационного контроля (Казеннов и Кикнадзе, 2011;



Казеннов и др., 2008; Казеннов, 1996; Chernyaev et al., 2004). Практически для всех затопленных радиационно-опасных объектов основным индикатором утечки радиоактивности, а, следовательно, и разрушения защитных барьеров является обнаружение в воде долгоживущих гамма-излучающих радионуклидов: продукта деления ядерного топлива – цезия-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) и кобальта-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) – продукта нейтронной активации реакторных конструкций. При этом для надежного обнаружения этих радионуклидов в морской среде необходим именно спектрометрический метод, так как в состав морской воды и донных отложений входят природные источники гамма-излучения: калий-40 ( $^{40}\text{K}$ ) и дочерние продукты распада радиоактивных семейств урана (U) и тория (Th). Из-за излучения этих природных радионуклидов мощность дозы в море при приближении дозиметра к донному грунту может естественным образом увеличиться более чем в 10 раз.

В этой связи в Арктических экспедициях ИО РАН стал использоваться качественно новый подход к исследованиям радиационной обстановки в акваториях, который предполагает изучение уровней излучения в непосредственной близости от конкретных объектов с помощью подводной гамма-спектрометрической аппаратуры типа РЭМ, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт». В качестве носителя гамма-спектрометра было решено использовать ТНПА ГНОМ, созданный ООО «Индел-Партнер» в сотрудничестве с ИО РАН (Римский-Корсаков и др., 2015). На фотографии на рис. 15 представлен ТНПА ГНОМ с гамма-спектрометром РЭМ-35-2.

ТНПА класса мини ГНОМ ([www.gnomrov.ru](http://www.gnomrov.ru)) является основным инструментом целенаправленных видеонаблюдений и радиационного контроля подводных объектов в экспедициях ИО РАН в Арктике. ГНОМ имеет четыре винтомоторных агрегата для обеспечения движения по вертикальной и горизонтальной осям и оборудован цветной высокоразрешающей телекамерой с четырьмя источниками зали-



Рис. 15. ТНПА «ГНОМ» с высокочувствительным подводным гамма-спектрометром РЭМ-35-2.

вающего света на базе светодиодных матриц. В составе базового аппаратного комплекса имеется глубомер и компас, которые обеспечивают удержание аппарата на заданном горизонте и стабилизацию движения по курсу. Длина стандартного соединительного кабеля с кремне-органическим грузонесущим сердечником составляет 150 м. Дополнительно ТНПА может быть оборудован захватом-манипулятором, гидролокатором секторного обзора типа SeaKing, системой позиционирования с ультракороткой базой TriTech и кабелем длиной 500 м. Аппаратурный комплекс ГНОМ включает собственно ТНПА, вьюшку с кабелем и токоъемником, аккумулятор, блок управления, видеомонитор и записывающее устройство. Все элементы размещаются в двух водонепроницаемых контейнерах общим весом до 30 кг.

В разное время в Арктических экспедициях ИО РАН, в том числе для контроля состояния подводных потенциально опасных объектов с использованием гамма-спектрометров, применялись также ТНПА осмотрового класса «Мираж» и «Фалькон».

Высокочувствительный подводный спектрометр РЭМ-35-2 представляет собой блок детектирования БДЭГ-75(75)Б на основе монокристалла ВГО 75×75 мм с низкофоновым ФЭУ типа R6233-01 (Кикнадзе, 2016). Рабочая глубина спектрометра – 200 м. Чувствительность кристалла ВГО позволяет проводить измерения концентраций гамма-излучающих техногенных радионуклидов в морской воде на уровне в десятки раз ниже предельно допустимых, а в донном грунте – на уровне фоновых значений, вызванных глобальными выпадениями. Спектрометр предназначен для работы как в автономном режиме, так и в режиме реального времени, с использованием интерфейса RS-485. Небольшие размеры гамма-спектрометра дают возможность также исследовать радиоактивность водной среды вручную с катера.

В процессе исследований с помощью РЭМ-35-2 регистрируемые спектры в режиме реального времени отображаются на дисплее ПЭВМ, что позволяет корректировать перемещение ТНПА в зависимости от наличия и интенсивности техногенных гамма-излучателей в морской среде. В процессе работы оператор ТНПА может наблюдать окрестности измерений и визуально идентифицировать объекты или их элементы, являющиеся источником радиоактивного излучения. Измерение начинается при подходе ТНПА к исследуемому объекту. Экспозиция единичного измерения выбирается равной 60 с, что обеспечивает предел обнаружения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностном слое донных отложений на уровне 15 Бк/кг мокрого грунта и в морской воде – 0,35 Бк/л. Пример представления информации, получаемой с помощью комплекса «ГНОМ-РЭМ» приведен на рис. 16.

Таким образом в процессе подготовки и обеспечения экологических исследований в ИО РАН в Арктике были определены:

- факторы и параметры радиационной обстановки, наиболее полно характеризующие состояние окружающей среды и позволяющие прогнозировать его изменения;
- виды и характеристики оптимальных методов и средств подводных измерений радиоактивности, а также видеооборудования и средств координатно-временной привязки получаемых данных;



– характеристики технологий доставки радиометрической и видео аппаратуры к подводным объектам с использованием подводных аппаратов в судовых условиях, а также при работе с маломерных плавсредств на мелководье.

Важным итогом проведенных исследований можно считать правильность выбранных подходов к методике экспедиционных исследований мест радиоактивных захоронений и определения степени их потенциальной опасности с точки зрения радиационного воздействия на окружающую среду. Уже проведенные исследования не выявили в местах измерений наличие загрязнения техногенными радионуклидами морской среды выше уровней, характерных для районов выполнения работ.

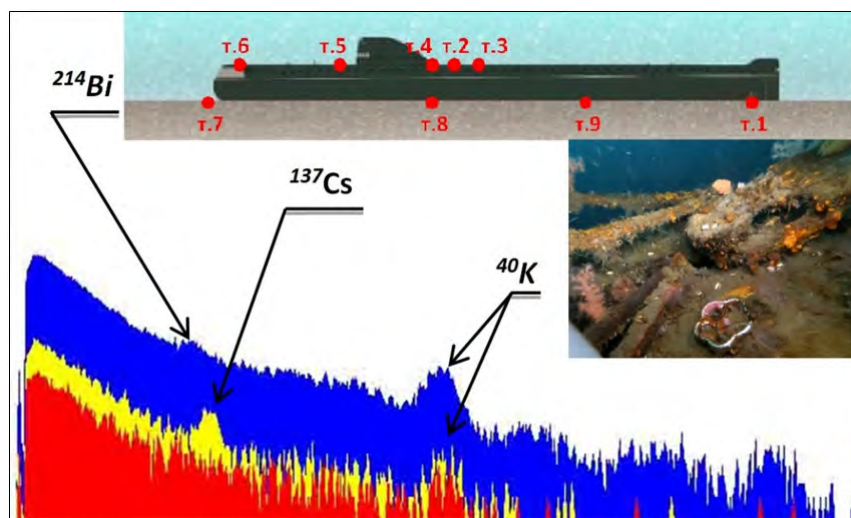


Рис. 16. Спектры, зарегистрированные на корпусе АПЛ К-27 в точках №№ 2, 5 и 9 (обозначены соответственно, желтым, красным и синим цветами);верху – схема расположения точек на корпусе АПЛ, справа – видеоизображение места проведения измерений у пролома в легком корпусе АПЛ (точка 2), где был найден  $^{137}\text{Cs}$  (Кикнадзе, 2016).

Удельная активность естественных радионуклидов соответствует типу осадочных пород в местах отбора проб. Использование имеющейся аппаратуры в экспедициях доказало свою эффективность.

Следует отметить, что загрязнение и радиоактивный фон акваторий заливов следует рассматривать как результат взаимодействия многих гидрологических и биологических процессов, испытывающих разномасштабные временные колебания. В этой связи оценку степени радиоактивного загрязнения целесообразно проводить на основе данных многолетних наблюдений. Поэтому необходимо на регулярной основе проводить контроль загрязнения морской среды в районах захоронения радиоактивных отходов и на сопредельных площадях не реже 1 раза в год.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты Кар\_а 14-05-05001, Рго\_а 13-05-41001), а также РНФ (проект 14-50-00095). Авторы благодарны А.Ю. Казеннову, Б.Я. Розману, А.А. Пронину, О.Л. Кузнецову, А.В. Багницкому, а также экипажу и капитану НИС «Академик Мстислав Келдыш» Ю.Н. Горбачу за содействие в проведении экспериментальных работ и исследований.

## Литература

- Айбулатов Н.А.* Экологическое эхо холодной войны в морях Российской Арктики: М.: ГЕОС, 2000. 307 с.
- Войтов Д.В.* Автономные необитаемые подводные аппараты: М.: МОРКНИГА, 2015. 332 с.
- Вяльцев А.И., Нерсесов Б.А., Римский-Корсаков Н.А.* Исследование потенциально опасных объектов в Балтийском море: М.: ФБГНУ «Аналитический центр» Минобрнауки России, 2015. 272 с.
- Вяльцев А.И., Нерсесов Б.А., Римский-Корсаков Н.А.* Исследование потенциально опасных объектов в Черном море: М.: ФБГНУ «Аналитический центр» Минобрнауки России, 2016. 284 с.
- ГНОМ, телеуправляемый подводный аппарат. [www.gnomrov.ru](http://www.gnomrov.ru)  
Интернет-ресурс: <http://avtonomka.org/kniga-vracha/1012>
- Казеннов А.Ю.* Мониторинг радиоактивного загрязнения морей // Сборник трудов I-е Александровские чтения, – РНЦ «Курчатовский институт». М., 1996. – С. 31–40.
- Казеннов А.Ю., Кикнадзе О.Е.* Технологии мониторинга и некоторые результаты обследования объектов, затопленных в Арктических морях. // Материалы семинара Контактной экспертной группы МАГАТЭ «Исследование АПЛ и объектов с ядерным топливом и радиоактивными отходами, затопленных в Арктических морях, и стратегии радиозэкологической реабилитации региона». – 16–17 февраля 2011, Осло. Норвегия.
- Казеннов А.Ю., Кикнадзе О.Е., Алексеев И.Н. и др.* Современное состояние затопленных объектов с ОЯТ и ТРО в заливах архипелага Новая земля (по данным экспедиций 2004–2006 гг.) // Сборник тезисов докладов международной конференции «Международное сотрудничество по ликвидации ядерного наследия атомного флота СССР», – ЦНИИ АТОМИНФОРМ 16–18 апреля, Москва, 2008. – С. 18.
- Кикнадзе О.Е.* Оборудование, использованное при обследовании ППОО // В отчете об экспедиции «Экосистемы Российской Арктики» 66 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2016.
- Римский-Корсаков Н.А., Казеннов А.Ю., Розман Б.Я.* Технология мониторинга экологии заливов восточного побережья Новой Земли // Материалы научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований», – М.: ООО «АПР», 2015. – С. 258–266.
- Римский-Корсаков Н.А., Кузнецов О.Л., Пронин А.А.* Интерпретация гидролокационных изображений подводных потенциально опасных объектов в Карском море // Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научный центр РАН, 2016. – С. 410–413.
- Римский-Корсаков Н.А., Никитин Г.А.* Гидролокационные технологии и средства исследования дна Мирового океана // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. Под редакцией академика Н. Спасского. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. С. 92–101.
- Римский-Корсаков Н.А., Пронин А.А., Розман Б.Я.* Некоторые результаты работ по поиску и обследованию подводных потенциально опасных объектов в Карском море в 54 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» // Сборник 9 Всероссийской конференции ГА2008, «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – С.-Петербург: Наука, 2008. – С. 141–144.
- Римский-Корсаков Н.А., Сычев В.А.* Многоцелевой гидролокатор бокового обзора «Мезоскан-М» // Сборник трудов международной конференции МСОИ-2007. – Т. 2, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН Москва, 2007. – С. 15–20.

- Флинт М.В., Зацепин А.Г., Кучерук Н.В., Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А. Комплексные исследования экосистемы Карского моря (54-рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 6. С. 947–951.
- Флинт М.В., Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А. Экосистемы российской Арктики-2015 (63-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 3. С. 499–501.
- Chernyaev A., Gaponov I., Kazennov A. Direct methods for radionuclides measurement in water environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. No. 72. 2004. P. 187–194.
- IMAGENEX MODEL 872 “YELLOWFIN” SIDESCAN SONAR. [www.imagenex.com](http://www.imagenex.com)

## TECHNICAL ASPECTS OF THE ENVIRONMENTAL RESEARCH OF KARA SEA WESTERN PART

S.G. Poyarkov<sup>1</sup>, N.A. Rimsky-Korsakov<sup>1,2</sup>, M.V. Flint<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [nrk@ocean.ru](mailto:nrk@ocean.ru), [m\\_flint@ocean.ru](mailto:m_flint@ocean.ru)*

<sup>2</sup>*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia  
e-mail: [nrk@ocean.ru](mailto:nrk@ocean.ru) (<mailto:nrk@ocean.ru>)*

Submitted 10.10.2017, accepted 25.12.2017

The article is devoted to the analysis of Instruments and methods of underwater research, which were used to study the ecology of the Kara Sea solid radioactive waste (SRW) dumping regions, as well as to examine the condition of radiation-hazardous objects. The article deals with technical and methodical solutions to the problems of searching for underwater objects and studies of the morphology of the bottom relief using sonar methods. An important stage in the process of research of underwater radiation-hazardous objects is their identification and determination of compliance with archival data. These operations are carried out using underwater video systems, allowing to visually determine the state of underwater objects and protective barriers separating sources of radioactivity from the environment. The state of these barriers is also assessed by the levels of radioactivity outside the objects and on the adjacent areas of the bottom using underwater gamma spectrometers. Sonars, video systems and gamma spectrometers are delivered to the objects of research with the help of underwater instruments carriers. These include towed, remote-controlled and autonomous uninhabited underwater vehicles (UTSI, ROV and AUV). UTSI and AUV are used mainly for work on specified routes with sonar or video equipment. ROVs are used for objects inspection and visually controlled targeted gamma-spectrometric measurements and sampling. This technology was developed in the process of marine research of SRW dumping regions in the Kara Sea, it allowed to obtain modern data on environment and flooded objects state and though confirmed the correctness of the selected research methodology.

**Keywords:** Novaya Zemlya, Kara Sea, radioactive waste, sonar, video system, gamma spectrometer, underwater vehicle, route survey, targeted observations.

### References

- Ajbulatov N.A.*, *Jekologicheskoe jeho holodnoj vojny v morjah Rossijskoj Arktiki*: Moskva: GEOS, 2000, 307 p.
- Chernyaev, A. I. Gaponov, A. Kazennov*, Direct methods for radionuclides measurement in water environment, *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 72, 2004, pp. 187–194.
- Flint M.V., Poyarkov S.G., Rimskii-Korsakov N.A.*, Ecosystems of the Russian Arctic-2015 (63rd

- Cruise of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh), *Oceanology*, 2016, Vol. 56, No. 3, pp. 459–461.
- Flint M.V., Zatsepin A.G., Kucheruk N.V., Poyarkov S.G., Rimskij-Korsakov N.A., Multidisciplinary studies of the ecosystem of the Kara Sea: Cruise 54 of R/V Akademik Mstislav Keldysh, *Oceanology*, 2008, Vol. 48, No. 6, pp. 883–887.
- GNOM, teleupravljajemyj podvodnyj apparat, [www.gnomrov.ru](http://www.gnomrov.ru).
- Imagenex model 872 “yellowfin” sidescan sonar, [www.imagenex.com](http://www.imagenex.com)
- Internet-resurs: <http://avtonomka.org/kniga-vracha/1012>.
- Kazenov A.Ju., Monitoring radioaktivnogo zagrjaznenija morej, Sbornik trudov I-e Aleksandrovskie chtenija, RNC «Kurchatovskij institut», Moskva, 1996, pp. 31–40.
- Kazenov A.Ju., Kiknadze O.E., Tehnologii monitoringa i nekotorye rezul'taty obsledovanija ob'ektov, zatoplennyh, v Arkticheskikh morjah, Materialy seminarov Kontaktnoj jekspertnoj grupy MAGATJe «Issledovanie APL i ob'ektov s jadernym toplivom i radioaktivnymi othodami, zatoplennyh v Arkticheskikh morjah, i strategii radiojekologicheskoj rehabilitacii regiona», 16–17 fevralja 2011, Oslo, Norvegija.
- Kazenov A.Ju., Kiknadze O.E., Alekseev I.N. i dr., Sovremennoe sostojanie zatoplennyh ob'ektov s OJaT i TRO v zalivah arhipelaga Novaja zemlja (po dannym jekspedicii 2004–2006 gg.), Sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnoj konferencii «Mezhdunarodnoe sotrudnichestvo po likvidacii jadernogo nasledija atomnogo flota SSSR», CNII ATOMINFORM 16–18 aprelja, Moskva, 2008, P. 18.
- Kiknadze O.E., Oborudovanie, ispol'zovannoe pri obsledovanii PPOO, V otchete ob jekspedicii «Jekosistemy Rossijskoj Arktiki» 66 rejsa NIS «Akademik Mstislav Keldysh». Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, Moskva, 2016.
- Rimskij-Korsakov N.A., Kazenov A.Ju., Rozman B.Ja., Tehnologija monitoringa jekologii zalivov vostochnogo poberezh'ja Novoj Zemli, Materialy nauchnoj konferencii «Jekosistema Karskogo morja – novye dannye jekspedicionnyh issledovanij», Moskva: OOO «APR», 2015, pp. 258–266.
- Rimskij-Korsakov N.A., Kuznecov O.L., Pronin A.A., Interpretacija gidrolokacionnyh izobrazhenij podvodnyh potencial'no opasnyh ob'ektov v Karskom more, Trudy XIII Vserossijskoj konferencii «Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki», Sankt-Peterburg, Sankt-Peterburgskij nauchnyj centr RAN, 2016, pp. 410–413.
- Rimskij-Korsakov N.A., Nikitin G.A., Gidrolokacionnye tehnologii i sredstva issledovanija dna Mirovogo okeana, Podvodnye tehnologii i sredstva osvoenija Mirovogo okeana. Pod redakciej akademika N. Spasskogo, Moskva: Izdatel'skij dom «Oruzhie i tehnologii», 2011, pp. 92–101.
- Rimskij-Korsakov N.A., Pronin A.A., Rozman B.Ja., Nekotorye rezul'taty rabot po poisku i obsledovaniju podvodnyh potencial'no opasnyh ob'ektov v Karskom more v 54 rejse NIS «Akademik Mstislav Keldysh», Sbornik 9 Vserossijskoj konferencii GA2008, «Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki», S.-Peterburg: Nauka, 2008, pp. 141–144.
- Rimskij-Korsakov N.A., Sychev V.A., Mnogocelevoj gidrolokator bokovogo obzora «Mezoskan-M», Sbornik trudov mezhdunarodnoj konferencii MSOI-2007, Vol. 2, Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, Moskva, 2007, pp. 15–20.
- Vjalyshev A.I., Nersesov B.A., Rimskij-Korsakov N.A., Issledovanie potencial'no opasnyh ob'ektov v Baltijskom more: M.: FBGNU «Analiticheskij centr» Minobrnauki Rossii, 2015, 272 p.
- Vjalyshev A.I., Nersesov B.A., Rimskij-Korsakov N.A., Issledovanie potencial'no opasnyh ob'ektov v Chernom more: M.: FBGNU «Analiticheskij centr» Minobrnauki Rossii, 2016, 284 p.
- Vojtov D.V., Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty, Moskva: MORKNIGA, 2015, 332 p.



## СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДНА И ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.А. Римский-Корсаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [nrk@ocean.ru](mailto:nrk@ocean.ru)*

<sup>2</sup> *Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана,  
105005, Москва, 2-я Бауманская улица, 5с 1, e-mail: [nrk@ocean.ru](mailto:nrk@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 15.11.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Технология натуральных исследований есть совокупность материальной и методической составляющих. Методическая часть – это научно-обоснованный способ и последовательность применения материальной части. Материальная часть технологий гидролокационных исследований включает навигационные и гидролокационные приборы, которые подразделяются на поверхностные, заглубляемые, стационарные, буксируемые, автономные, а также приборы, устанавливаемые на подводных аппаратах. В основном все рассматриваемые средства используют единый принцип действия. Их важной составляющей являются устройства отображения и сбора информации, которые включают управляющие программы и программы обработки информации. Методически, технология гидролокационного исследования дна и подводных объектов подразделяется на три этапа. На первом этапе ведется отображение и сбор информации. На втором этапе ведется подготовка информации к обработке стандартными пакетами программ. На третьем этапе ведется собственно обработка информации, целью которой является представление ее в виде, удобном для анализа потребителями. Состав и структура технологии зависит от типа обследуемых объектов, места их нахождения и задач исследования. Применение эффективной методики проведения работ дает подчас лучший результат, нежели применение дорогостоящих приборов.

**Ключевые слова:** технология, гидролокация, технические средства, методика, сбор информации, обследуемые объекты, задачи исследования, район работ, плавсредство

Технологии натуральных исследований представляют собой совокупность двух составляющих: материальной и методической. Материальная часть включает технические средства, программное обеспечение, а также оборудование, обеспечивающее проведение исследований в целом. Методическая часть представляет собой научно-обоснованный способ и последовательность применения элементов материальной части.

Материальная часть технологии гидролокационных исследований дна и подводных объектов, в первую очередь, включает гидролокационные и навигационные приборы, программное обеспечение для сбора и обработки информации, а также судовое и вспомогательное оборудование, обеспечивающее проведение исследований в целом.

Рассмотрим структуру технологии исследования дна и подводных объектов с использованием следующих приборов: во-первых, гидролокаторов бокового обзора трех типов: дальнего действия с рабочей частотой 5–30 кГц, среднечастотных с



рабочей частотой 50–100 кГц и высокочастотных с рабочей частотой 200–500 кГц; во-вторых, акустических профилографов для зондирования верхней толщи рыхлых донных отложений с рабочей частотой 3–10 кГц и, в-третьих, высокочастотных эхолотов с рабочей частотой 70–500 кГц. Рассматриваемые гидролокационные средства используют единый принцип действия (Принципы..., 1982; Яковлев, Каблов, 1983; Александров и др., 2008). Электрический зондирующий сигнал, генерируемый передающим устройством, преобразуется в акустический сигнал с помощью электроакустического преобразователя и излучается в сторону объекта исследования. Эхо-сигнал от объекта принимается и преобразуется в электрический сигнал с помощью того же самого, либо отдельного электроакустического преобразователя и поступает в приемно-усилительное устройство для анализа. Анализируется во всех гидролокационных средствах время распространения и амплитуда сигнала, реже частота и фаза сигнала. Гидролокационные средства разного назначения в основном характеризуются формой характеристики направленности электроакустического преобразователя (антенны) и рабочей частотой. Вторичными параметрами являются способ формирования характеристики направленности, мощность и вид зондирующих сигналов.

Перечисленные приборы гидролокационного типа (Римский-Корсаков, Никитин, 2011) подразделяются на поверхностные и заглубляемые. Классификационная схема приведена на рис.1. Поверхностные в свою очередь бывают **стационарные** и **буксируемые**. Акустическая антенна стационарных приборов жестко крепится к борту либо днищу плавсредства (судна), а буксируемых – в специальном носителе, который буксируется за судном. Приемно-передающий блок, устройство сбора и отображения информации поверхностных приборов устанавливаются на борту судна.

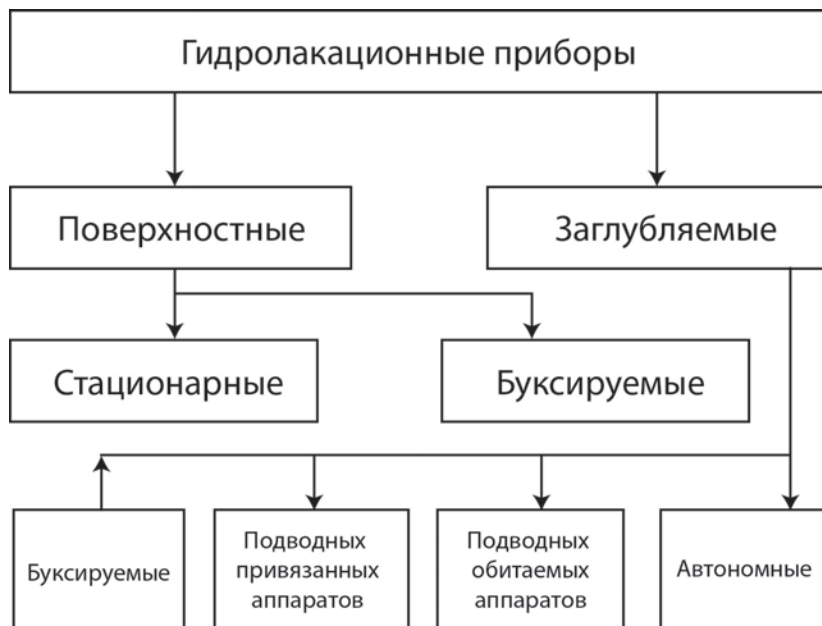


Рис.1. Схема, иллюстрирующая классификацию гидролокационных приборов.

Различают четыре типа заглубляемых гидролокационных приборов: а) буксируемые; б) приборы, установленные и входящие в состав аппаратного комплекса подводных буксируемых аппаратов; в) приборы, установленные на подводных обитаемых и автономных аппаратах; г) автономные приборы.

**Заглубляемые буксируемые** приборы включают: а) носитель, несущий акустические антенны и электронный блок, который в зависимости от рабочих глубин прибора и длины кабельной буксирной линии может содержать устройства телеметрии, приемные или приемо-передающие блоки, б) судовую аппаратуру, включающую устройства приема, сбора и отображения информации, которая может содержать, передающие устройства и устройства телеметрии.

Отличие гидролокационных **приборов, устанавливаемых на подводных буксируемых аппаратах** (Римский-Корсаков, 2011), от заглубляемых буксируемых приборов состоит в том, что синхронизация их работы и передача данных на борт судна осуществляется с помощью систем телемеханики аппарата в соответствии с режимом работы остальных приборов.

Гидролокационные **приборы подводных обитаемых и автономных аппаратов** (Суконкин, 2011) включают антенную систему, устанавливаемую за бортом аппарата, а также приемо-передающий блок с устройством сбора и отображения информации, устанавливаемые внутри прочного корпуса аппарата.

Примером **автономного прибора** является так называемый пингер, используемый в качестве акустического профилографа.

Примеры гидролокационных средств, соответствующих классификации на рис. 1, приведены в таблице.

Из таблицы, в частности, следует, что приборы и комплексы, предназначенные для работы на разных глубинах, обладают различными конструктивными особенностями.

Важной составной частью приборов гидролокационного типа являются **устройства отображения и сбора информации** (Руссак и др., 2017; Руссак, Тихонова, 2015) в реальном времени (в настоящее время, как правило цифровые). Эти устройства могут входить в состав каждого из перечисленных гидролокационных приборов, либо быть общими для набора приборов.

Навигационные приборы – это, в первую очередь, **средства определения местоположения** гидролокационного прибора в процессе сбора информации. Желательной важной частью навигационного прибора является **устройство отображения навигационной обстановки** в реальном времени, облегчающее проводку судна с гидролокационным прибором по заданному маршруту. Часто при построении стационарных гидролокационных комплексов устройства отображения и сбора гидролокационной и навигационной информации объединяются в единую систему (Пешехонов, 2008).

Программное обеспечение включает, во-первых, **управляющие программы**, обеспечивающие функционирование электронной гидролокационной и навигационной аппаратуры и сбор информации в реальном времени под управлением ПЭВМ,

Таблица 1.

№	Название, изготовитель	Раб.гл., м	Состав аппаратуры	Регистрация данных	Средства навигации
Глубоководные буксируемые аппараты					
1	«Звук-4» (ИОРАН)	4000	ГБО, АП, ЭХ, Фото	РСР+ЭХБ	Расчет
2	«Звук-Л» (ИОРАН)	6000	ГБО, АП, ЭХ, Фото	РСР+ЭХБ	Расчет
3	Звук-Комплек» (ИОРАН)	6000	ГБО, АП, ЭХ, Фото, Видео, Магнит	РСР+ЭХБ, ЭВМ+TV	КНС, ГАНС ДБ, ГАНС КБ
4	«Звук-МАФТ» (ИОРАН)	6000	ГБО, АП, ЭХ, Фото, Видео, Магнит	РСР+ЭХБ, ЭВМ+TV	КНС, ГАНС ДБ
5	«Звук-Л2» (ИОРАН)	6000	ГБО, АП	РСР+ЭТБ, ПЭВМ+HDD	КНС, Расчет
6	«Тобби» (NOI Wormley, UK)	8000	ГБО, АП, ЭХ	ПЭВМ+HDD	ГАНС ДБ и УКБ, КНС
7	«Deer Tow» (Вудсхолл, США)	6000	ГБО, АП, ЭХ, Фото, Видео, Магнит	РСР+ЭХБ, ЭВМ+TV	КНС, ГАНС ДБ
8	«Мезоскан» (ИОРАН)	2000	ГБО1, ГБО2, АП	ПЭВМ+HDD	КНС, ГАНС ДБ, Расчет
Буксируемые приборы					
9	«Микросаунд» (ИОРАН)	100	ГБО	ПЭВМ+HDD	КНС, Расчет
10	«Chirp-II»	600	АП	ПЭВМ+МОПТ	КНС, Расчет
11	«Sea King» (Trettech, UK) (Datasonics, США)	100	ГБО	ПЭВМ+HDD	КНС, Расчет
Бортовые приборы автономных плавсредств					
12	«МКС» (ИОРАН)	20	ГБО, ЭХ	ПЭВМ+HDD	КНС
13	«АП-5» (ИОРАН)	20	АП, ЭХ	ПЭВМ+HDD	КНС
14	ГИДРА (НПО «Экран»)	20	МГБО	ПЭВМ+HDD	КНС

В таблице введены следующие обозначения: **ГБО** – гидролокатор бокового обзора, **АП** – акустический профилограф, **ЭХ** – высокочастотный эхолот, **Магнит** – магнитометр, **Фото** – фото-система, **Видео** – телевизионная система, **СТД** – гидрофизический зонд, **РСР** – графический регистратор со строчной разверткой, **ЭХБ** – электрохимическая бумага, **ЭТБ** – электротермическая бумага, **HDD** – накопитель на жестком магнитном диске, **МОПТ** – магнитооптический дисковод, **КНС** – космическая система навигации (GPS, ГЛОНАСС и др.), **ГАНС ДБ** – гидроакустическая навигационная система с длинной базой, **КБ** – с короткой базой, **УКБ** – с ультракороткой базой, **Расчет** – способ определения местоположения буксируемого носителя расчетным путем, исходя из характеристик буксирной линии, параметров движения и ориентации судна-буксировщика.

во-вторых, **программы камеральной подготовки, обработки и представления** собранной информации в требуемом виде на ПЭВМ (Сажнева, 2013), и, в-третьих, **программы тестирования**.

К вспомогательному оборудованию (Римский-Корсаков, 2017) относятся технические средства, которые сами по себе не являются источниками информации, но обеспечивают функционирование комплексов сбора и обработки гидролокационной информации в целом. Это, во-первых, **средства доставки** гидролокационных

приборов к объекту исследования, такие как суда и другие плавсредства, подводные обитаемые и необитаемые аппараты, во-вторых **судовое такелажное оборудование**, такое как спуско-подъемные и буксировочные устройства, кабельные лебедки, устройства для жесткого крепления гидролокационных приборов к борту судна и, в-третьих, **источники электропитания**.

Методически или в информационно-временном отношении технология гидролокационного исследования рельефа дна и подводных объектов подразделяется на **три основных этапа**, характеризующихся последовательностью получения и состоянием информации об объекте исследования.

На первом этапе ведется отображение и сбор информации, состояние которой определяется гидролокационными изображениями и изображениями навигационной обстановки реального времени, представляемыми на экране видео-монитора либо бумажном носителе самописца, а также цифрами глубин и координат. На этом этапе задействована практически вся материальная часть технологии. Методика работы и характеристики приборов определяют максимальные точности и детальность исследований. Итогом работ на этом этапе являются файлы гидролокационных изображений, либо записи изображений на бумажном носителе, а также файлы с цифрами глубин и координат.

На втором этапе ведется подготовка информации к обработке стандартными пакетами программ в камеральном режиме. Итогом подготовки являются масштабированные гидролокационные изображения на твердой основе (распечатки, мозаики), файлы с массивами батиметрических данных, файлы координат контуров областей и объектов естественного и искусственного происхождения, просто координаты объектов поиска и т. п.

На третьем этапе ведется собственно обработка информации, целью которой является представление ее в виде, во-первых, удобном для анализа специалистами – океанологами, геологами, геоморфологами, геофизиками, а, во-вторых, в виде требуемом нормативными документами инженерных и инженерно-геологических изысканий, гидрографических и поисковых работ. При этом используются стандартные пакеты программ, такие как AUTOCAD, Golden Software, CORELDRAW и др.

Часто использование конкретных технических средств, а также в связи с конкретными узкими задачами исследований, этапы технологии гидролокационного обследования могут отсутствовать. Если, например, информация, собранная на первом этапе, пригодна для обработка стандартными программами, то этап подготовки не нужен. Второй этап также исключается, если для обработки используются оригинальные программы, адаптированные к форматам собранной информации. В ряде случаев, например, при поисковых работах, координаты целей могут быть определены в реальном времени по гидролокационному изображению на видеомониторе, либо на бумажном носителе самописца. В этом случае отсутствуют этапы подготовки и обработки информации. Основываясь на этих примерах, можно сделать вывод, что деление технологии гидролокационного обследования на три этапа весьма условно.

С другой стороны, деление технологии гидролокационного обследования на этапы сбора, подготовки и обработки информации позволяет детализировать принципы построения технологии и оптимизировать структуру технологии для решения конкретных задач исследований дна и подводных объектов в конкретных условиях.

Состав и структура материальной и методической частей технологий исследования рельефа дна и подводных объектов существенно варьируются в зависимости от **типа обследуемых объектов, места их нахождения и задач исследования.**

Как правило гидролокационные методы используются для исследования таких **объектов**, как:

- мезоформы рельефа дна (песчаные волны и гряды, песчаные и гравийные полосы, выходы коренных пород, места выделений газов, районы гидротермальной активности, тектонические сдвиги и их ориентация, и т. д.), структура и объекты верхней толщи осадочного покрова (от жидкого ила до песка);

- формы генерального рельефа дна океана размером от единиц до десятков километров (подводные горы, хребты, каньоны, поля ЖМК).

- места захоронений образцов оружия и боеприпасов, взрывчатых и отравляющих веществ, токсичных и радиоактивных отходов промышленности и деятельности энергоустановок;

- затонувшие суда, имеющие на борту существенное количество горюче-смазочных материалов, нефтепродуктов, токсичных веществ гражданского применения, боеприпасы, содержащие, в том числе, отравляющие вещества;

- подводные кабели, продуктопроводы, траншеи, карьеры, заграждения;

- подводные части плотин, причальных сооружений, берегоукреплений, дамб, намытых массивов и пляжей;

При исследовании перечисленных объектов решаются следующие научные и **прикладные задачи**:

- поиск объектов искусственного и естественного происхождения, определение мест их расположения, распространения и построение схем расположения (картирование);

- исследование морфологии, в т. ч. батиметрическая съемка форм рельефа; определение ориентации плановых и высотных размеров форм (статистика); исследование процессов переноса осадков; геологические и геотектонические исследования;

- археологические исследования;

- инженерно-геологические изыскания (предварительное обследование трасс подводных трубопроводов, кабелей, нефтяных и газовых терминалов, траншей),

- обследование инженерных объектов.

**Районы** распространения объектов исследований разнообразны и, в первом приближении, могут быть классифицированы по глубине места, а именно:

- глубоководные участки океанов, морей, крупных озер (более 200 м),

- морской шельф (менее 200 м),

- морское мелководье (от 0 до 10–20 м),

- акватории портов и внутренние водоемы (реки, озера, водохранилища, пруды, в т. ч. технического назначения, каналы).



Таким образом, основными составляющими частями технологии исследования дна акваторий и подводных объектов гидролокационными методами являются: гидроакустические средства; средства навигационной привязки данных; вспомогательное оборудование, в том числе плавсредства, а также методика формирования аппаратурно-программных комплексов сбора и обработки информации и методика их использования для проведения исследований. Применение продуманной научно-обоснованной методики проведения работ и гибкой системы обработки получаемой информации подчас дают больший эффект, чем использование дорогостоящей аппаратуры и оборудования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010) при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-05-41041) и РНФ (проект № 14-50-00095).

### Литература

- Александров Г.А., Полканов К.И., Селезнев И.А., Смирнов С.А.* Гидроакустические системы // Роль Российской науки в создании отечественного подводного флота. М.: Наука, 2008. С. 438–445.
- Пешехонов В.Г.* Проблема подводной навигации и ее решение // Роль Российской науки в создании отечественного подводного флота. М.: Наука, 2008. С. 383–390.
- Принципы построения технических средств освоения океана. Под ред. профессора В.С. Ястребова. М.: Наука, 1982. 265 с.
- Римский-Корсаков Н.А.* Создание и эксплуатация подводных аппаратов и других технических средств для океанологических исследований // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. С. 46–63.
- Римский-Корсаков Н.А.* Технические средства для исследования дна акваторий гидролокационными методами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 10. Ч. 2. С. 205–213.
- Римский-Корсаков Н.А., Никитин Г.А.* Гидролокационные технологии и средства исследования дна Мирового океана // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. С. 92–101.
- Руссак Ю.С., Нафиков В.М., Тихонова Н.Ф.* Система сбора и обработки гидроакустической информации // Современные методы и средства океанологических исследований: Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции МСОИ 2017. –Т. 2. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН Москва, 2017. – С. 355–357.
- Руссак Ю.С., Тихонова Н.Ф.* Универсальный модуль «RA8-USB» // Современные методы и средства океанологических исследований: Материалы XIV Международной научно-технической конференции МСОИ-2015. – Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН Москва, 2015. – С. 315–318.
- Сажнева А.Э.* Технологии выявления скрытой информации изображений (на основе гидролокационных исследований). М.: Научный мир, 2013. 86 с.
- Суконкин С.Я.* Технические средства для фундаментальных исследований Мирового океана // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. С. 104–117.
- Яковлев А.Н., Каблов Г.П.* Гидролокаторы ближнего действия. // Библиотека инженера-гидроакустика. Л.: Судостроение, 1983. 200 с.

## TECHNOLOGY STRUCTURE OF BOTTOM AND SUBMARINE OBJECTS SONAR RESEARCH

Rimsky-Korsakov N.A. <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [nrk@ocean.ru](mailto:nrk@ocean.ru)

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University,  
5, build. 1, 2-nd Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russia, e-mail: [nrk@ocean.ru](mailto:nrk@ocean.ru)

Submitted 15.11.2017, accepted 25.12.2017

The technology of field studies is a combination of material and methodological components. The methodical part is a scientifically grounded method and sequence of application of the material part. The material part of the sonar research technology includes navigation and sonar devices, which are subdivided into surface and buried, stationary and towed, autonomous, recessed and installed on underwater vehicles. Basically, all considered means use a single principle of operation. Their important component are the devices for displaying and collecting information, which include control and information processing software. Technically, the technology of sonar survey of the bottom and underwater objects is divided into three stages. First stage, is the collection and real time displaying of information. At the second stage, the information is prepared for processing with standard software packages. The third stage is the actual processing of information, the purpose of which is to present it in a form convenient for analysis by consumers. The composition and structure of technology depends on the type of objects surveyed, their location and research tasks. The application of effective methods of work provides sometimes better results than the use of expensive instruments.

**Keywords:** technology, sonar, technical means, methodology, information collection, surveyed objects, research tasks, area of work, boat

### References

- Aleksandrov G.A., Polkanov K.I., Seleznev I.A., Smirnov S.A.*, *Gidroakusticheskiye sistemy (Sonar systems)*, Rol' Rossiyskoy nauki v sozdanii otechestvennogo podvodnogo flota, Moskva: Nauka, 2008, pp. 438– 445.
- Rimskiy-Korsakov N.A., Nikitin G.A.*, *Gidrolokatsionnyye tekhnologii i sredstva issledovaniya dna Mirovogo okeana (Sonar technologies of World Ocean bottom research)*, *Podvodnyye tekhnologii i sredstva osvoyeniya Mirovogo okeana*, Moskva: Izdatel'skiy dom «Oruzhiye i tekhnologii», 2011, pp. 92– 101.
- Rimskiy-Korsakov N.A.*, *Sozdaniye i ekspluatatsiya podvodnykh apparatov i drugikh tekhnicheskikh sredstv dlya okeanologicheskikh issledovaniy (Creation and use of underwater vehicles and other ocean research instruments)*, *Podvodnyye tekhnologii i sredstva osvoyeniya Mirovogo okeana*, Moskva: Izdatel'skiy dom «Oruzhiye i tekhnologii», 2011, pp. 46– 63.
- Rimskiy-Korsakov N.A.*, *Tekhnicheskiye sredstva dlya issledovaniya dna akvatorii gidrolokatsionnymi metodami (Technical means for water bottom studying by sonar)*, *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2017, No. 10, Ch. 2, pp. 205–21.
- Russak YuS., Nafikov V.M., Tikhonova N.F.*, *Sistema sbora i obrabotki gidroakusticheskoy informatsii (Sonar data processing system)*. *Sovremennyye metody i sredstva okeanologicheskikh*

issledovaniy: mater. XV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Moskva, 2017, Vol. 2, pp. 355–357.

*Russak YU.S., Tikhonova N.F.*, Universal'nyy modul' «RA8-USB» (Universal electronic device “RA8-USB”), *Sovremennyye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy: Materiali XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Moskva, 2015, pp. 315–318.

*Peshekhonor V.G.*, Problema podvodnoy navigatsii i yeye resheniye (The problem of underwater navigation and its solution), *Rol' Rossiyskoy nauki v sozdanii otechestvennogo podvodnogo flota*, Moskva: Nauka, 2008, pp. 383–390.

*Printsipy postroyeniya tekhnicheskikh sredstv osvoyeniya okeana. Design principles of ocean research technology*, Ed. Professora V.S.Yastrebova, Moskva, Nauka, 1982, 265 p.

*Sazhneva A.E.*, Tekhnologii vyyavleniya skrytoy informatsii izobrazheniy (na osnove gidrolokatsionnykh issledovaniy) (Detection Technologies of image hidden information (based on sonar research), Moskva: Nauchnyy mir, 2013, 86 p.

*Sukonkin S.Ya.*, Tekhnicheskiye sredstva dlya fundamental'nykh issledovaniy Mirovogo okeana (Technical means for fundamental research of the World Ocean), *Podvodnyye tekhnologii i sredstva osvoyeniya Mirovogo okeana*, Moskva: Izdatel'skiy dom «Oruzhiye i tekhnologii», 2011, pp. 104–117.

*Yakovlev A.N., Kablov G.P.*, *Gidrolokatory blizhnego deystviya*, (Short range sonar), *Biblioteka inzhenera-gidroakustika*, Leningrad: Sudostroyeniye, 1983, 200 p.

**К 100-ЛЕТИЮ АКАДЕМИКА  
ЛЕОНИДА МАКСИМОВИЧА БРЕХОВСКИХ**

Научно-библиографический очерк публикуется с разрешения авторов и издательства «Наука» по материалам: Акустика неоднородных сред: в 2 т. / Бреховских Л. М., Годин О. А.; Науч. Совет Программы фундамент. исслед. Президиума РАН. М.: Наука, 2007 (Памятники отечественной науки. XX век).

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36*

Статья поступила в редакцию 10.11.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Научно-биографический очерк к 100-летию академика Л.М. Бреховских, создателя и главы научной школы по акустике океана, получившего широкое международное признание. Многие ученые как в нашей стране, так и за рубежом, в том числе и те, кто никогда не встречался с Л.М. Бреховских лично, считают себя его учениками. Это связано с тем, что основные труды Л.М. Бреховских, изданные на русском, английском и китайском языках, по мнению многих ученых, являются настольной книгой, основным учебным пособием в их исследовательской работе.

**Ключевые слова:** Л.М. Бреховских, рассеяние звука, метод касательной плоскости, распространение звуковых волн в слоистых средах



Л.М. Бреховских родился 6 мая 1917 г. в д. Стрункино Архангельской области в многодетной крестьянской семье. Его родители были неграмотны, но мать очень хотела, чтобы дети учились. Старшие братья ходили в школу-четырёхлетку за три километра, затем в семилетку за десять километров от деревни. Впоследствии они получили высшее образование и стали крупными специалистами в различных отраслях науки и техники. Л.М. Бреховских начал учиться в деревне Кошкино в одном километре от Стрункино, где также образовалась школа-четырёхлетка. Любил читать, хотя для этого приходилось ходить за десять километров в библиотеку. Один из старших братьев присылал Леониду Максимовичу из Ленинграда журналы “Вокруг света”, которые прочитывались “от корки до корки”. Именно тогда у Леонида Максимовича зародилась мечта о путешествиях, которая удачно осуществилась в его дальнейшей жизни – научные интересы физика-теоретика оказались тесно связаны с морскими экспедициями, с океаном.

После окончания четырёхлетки в 1929 г. Л.М. Бреховских не был принят в семилетку, так как его родители еще не успели вступить в колхоз (таковы были правила). Год он занимался крестьянскими работами и самостоятельно учил немецкий язык по случайно попавшемуся учебнику. В 1930 году по приглашению своего брата тринадцатилетний мальчик один едет из Архангельской области на Урал в г. Красноуральск, чтобы продолжать учебу. Здесь началось его увлечение физикой, которую преподавал молодой А.И. Китайгородский, впоследствии известный физик и популяризатор науки. Л.М. Бреховских много читал, причем его интересовали как специальные предметы; так и литература, музыка и театр. Окончив семилетку и проучившись некоторое время в Ленинграде в ФЗУ при заводе «Электросила», Л.М. Бреховских вернулся в Красноуральск, где успешно закончил восьмой класс.

В 1934 г. по совету своего другого брата, первокурсника Пермского государственного университета, Л.М. Бреховских поступает на подготовительные курсы при этом университете, за два с половиной месяца осваивает материал за девятый и десятый классы и успешно сдает вступительные экзамены на физико-математический факультет. Так начались серьезные занятия теоретической физикой у прекрасных преподавателей П.Е. Степанова (из московской школы физиков) и О.А. Базилевской (из ленинградской школы Фока). В студенческие годы Л.М. Бреховских работал лаборантом в кабинете теоретической физики, приступил к научно-исследовательской работе, измеряя теплоемкость грунтов в месте будущего строительства Камской ГЭС, редактировал студенческий научный журнал, участвовал в художественной самодеятельности. На пятом курсе П.Е. Степанов рекомендует Л.М. Бреховских в Московский университет В.С. Фурсову для выполнения дипломной работы. В Москве Леонид Максимович посещал семинар Л.И. Мандельштама, слушал лекции И.Е. Тамма и М.А. Леонтовича. Его дипломная работа «Квантовомеханическая теория естественной ширины спектральных линий» на конкурсе в Пермском университете получила первую премию, а сам он был рекомендован в аспирантуру.



В 1939 г. Л.М. Бреховских поступил в аспирантуру Физического института АН СССР. Его научный руководитель М.А. Леонтович предложил ему работу в области распространения радиоволн, но в то же время разрешил аспиранту самому определить направление своей работы. Л.М. Бреховских тогда представлялась наиболее интересной молекулярная и атомная, в частности, квантовая физика. Поэтому его первая статья 1941 года «К вопросу о диффузном рассеянии рентгеновских лучей», представленная в ДАН С.И. Вавиловым, затрагивала именно эти проблемы, как и последующие работы, в которых получены интересные результаты в области рассеяния рентгеновских лучей в жидкостях и кристаллах. Тема, предложенная М.А. Леонтовичем при поступлении в аспирантуру, отходит на второй план, хотя позднее теоретические вопросы распространения акустических волн стали основным направлением в научной деятельности Л.М. Бреховских.

Коллектив теоретического отдела ФИАН, где Л.М. проходил аспирантуру, был небольшой и очень дружный, в нем царил атмосфера творчества и научной взаимопомощи. Аспиранты участвовали в работе теоретического семинара, руководимого И.Е. Таммом, где выступали сотрудники отдела М.А. Марков, Е.А. Фейнберг, В.Л. Гинзбург, В.В. Владимирский. Неформальные обсуждения научных результатов, бесконечные споры и доказательства – все это формировало молодых людей как ученых, способствовало росту и развитию их творческого мышления. Именно здесь наиболее близким другом Леонида Максимовича стал А.М. Прохоров, будущий академик, лауреат Нобелевской премии.

В начале Великой Отечественной войны ФИАН был эвакуирован в Казань. К этому времени у Л.М. Бреховских накопилось уже достаточно много материалов по рассеянию рентгеновских лучей в кристаллах и жидкостях, и в октябре 1941 г. он защитил на эту тему диссертацию, получив первую ученую степень кандидата физико-математических наук.

После защиты кандидатской диссертации Л.М. Бреховских был принят в акустическую лабораторию ФИАН, возглавляемую Н.Н. Андреевым и работающую над проблемой защиты кораблей от немецких акустических мин. Так он впервые познакомился с подводной акустикой и вновь обратился к проблеме распространения волн для исследования законов спадания силы звука с расстоянием, определяющих дальность действия акустического трала. Начиная с этого времени, теория распространения радио и звуковых волн в слоистых средах стала одной из основных областей интересов Л.М. Бреховских. Для радиоволн решались задачи распространения между поверхностью Земли и ионосферой, а для звуковых волн – в первую очередь задачи распространения между частично отражающим и частично поглощающим дном и поверхностью моря. Кроме того, оказалось, что и сама толща воды имеет слоистую структуру, поэтому теория распространения волн в слоистых средах получила широкое применение для решения различных проблем.

В 1944 г. Л.М. Бреховских поступил в докторантуру акустической лаборатории ФИАН СССР, после окончания которой в 1947 г. защитил докторскую диссертацию по теории распространения звуковых и электромагнитных волн

в слоистых средах. В 1948 г. включенные в докторскую диссертацию работы молодого ученого были удостоены премии имени Н.Д. Папалекси.

В 1946 г. был проведен первый отечественный эксперимент по дальнему распространению звука в Японском море в ходе экспедиции на двух научно-исследовательских судах под руководством Л.Д. Розенберга и Н.И. Сигачева. Анализируя записи интенсивности звука, Л.Д. Розенберг обратил внимание, что на малых дистанциях (до 50 км) ослабление силы звука с расстоянием соответствовало обычным для того времени представлениям. Однако на больших дистанциях это ослабление происходило существенно медленнее. Изменился и характер принимаемого сигнала. За объяснением этого явления Л.Д. Розенберг обратился к своему сотруднику по акустической лаборатории Л.М. Бреховских. Анализ экспериментальных данных и глубокое понимание процессов распространения волн позволили Л.М. сделать вывод, что причиной необычно малого ослабления звука на больших дистанциях является его концентрация в слоях воды на глубинах, охватывающих минимум скорости звука, обусловленная рефракцией («полным отражением» от слоев с большей скоростью звука) звуковых лучей. При этом такие лучи лишены также периодических контактов с дном океана, при каждом отражении от которого теряется значительная часть энергии. Основной причиной формирования минимума скорости звука является ее незначительное возрастание с глубиной в соответствии с ростом гидростатического давления при практически постоянной температуре воды. Л.М. Бреховских удалось для простых моделей среды рассчитать как спадание интенсивности звука с расстоянием, так и форму и длительность сигнала на различных дистанциях. Результаты расчета хорошо совпали с данными эксперимента (“О распространении звука в слое жидкости с постоянным градиентом скорости распространения”, ДАН, 1948, при лучевой трактовке “О распространении звука в подводном звуковом, канале”, ДАН, 1949).

Открытие подводного волновода, названного впоследствии подводным звуковым каналом, имело огромное практическое значение и стало основой целого научного направления – акустики океана. За цикл научных исследований и практических разработок в области подводной акустики коллектив ученых (Л.М. Бреховских, Л.Д. Розенберг и др.) был удостоен Сталинской премии СССР 1951 г. Практически одновременно (работы 1946-48 гг.) к аналогичному выводу пришли ученые в США, анализируя данные эксперимента 1944 г. Но, так как в то время иностранные журналы попадали в СССР с существенной временной задержкой, в СССР об этом стало известно значительно позднее.

В конце 40-х, 50-х годах прошлого века, явившихся периодом становления акустики океана, появляется большое число научных работ разных авторов по распространению волн. В своих работах этого времени Леонид Максимович, наряду с лучевым приближением, развивал волновую теорию распространения в непрерывных слоистых средах. Рассматривались вопросы фокусировки звука, возникновение каустик, отражение и преломление плоских волн и звуковых импульсов и пучков. Для сферических волн был применен единый универсальный подход,

основанный на разложении сферической волны на плоские с последующим анализом интегрального выражения для отраженного и преломленного полей. Проведен подробный анализ так называемой боковой волны, связанной с явлением полного внутреннего отражения, при лучевой трактовке которой (см. “Отражение и преломление сферических волн”, УФН, 1949), по-видимому, впервые была использована концепция особых, дифракционных лучей, которая легла в основу целого нового направления – геометрической теории дифракции.

Систематическое изложение большей части результатов по теории распространения звуковых, упругих и электромагнитных волн, полученных к этому времени в мировой науке, отражено в вышедшей в 1957 г. монографии Л.М. Бреховских «Волны в слоистых средах» (Москва, изд. «Наука»). Параллельное изложение теории распространения волн разной природы оказалось весьма полезным в силу применяемых в исследованиях общих математических методов, общности явлений и, как следствие, взаимного обогащения. Эта книга (и ее более позднее издание) фактически является энциклопедией по теории распространения волн и до сих пор является настольной книгой для специалистов по гидроакустике, геофизике и смежным областям науки. Она получила широкую известность и признание и в других странах мира. В 1960 г. монография была издана в США на английском языке и в Пекине на китайском. До сих пор редкий журнал американского акустического общества (JASA) обходится без ссылок на эту книгу.

Монография Л.М. Бреховских была также с интересом встречена специалистами, традиционно занимающимися теорией распространения волн, прежде всего, электромагнитных. Сложные условия распространения звука в океане (зависимость скорости распространения волн от пространственных координат и т. п.) стимулировали ученых к обобщению разработанных ранее методов решения. Можно сказать, что произошло неформальное объединение всех специалистов по теории распространения волн различной природы.

В это же время Л.М. Бреховских продолжал заниматься также задачами рассеяния звуковых и электромагнитных волн на неровных поверхностях. Им был впервые предложен «метод касательной плоскости» для периодических поверхностей (“Дифракция звуковых волн на неровной поверхности”, ДАН, 1951, “Дифракция волн на неровной поверхности”, ЖЭТФ. 1952), который затем был распространен М.А. Исаковичем для поверхностей со случайными неровностями и Б.Ф. Курьяновым на случай двухмасштабных неровностей, т. е. на случай, когда одновременно присутствуют, как, например, это бывает при волнении морской поверхности, и крупные волны, и мелкая рябь. Этот метод, называемый также “приближением Кирхгофа”, и в настоящее время является одним из наиболее распространенных методов расчета рассеяния звуковых и электромагнитных волн на неровных границах.

В 50-е годы Л.М. Бреховских активно занимался научно-организационной работой. Будучи руководителем теоретического сектора, а затем заместителем заведующего акустической лабораторией ФИАН, Л.М. придавал большое значение

привлечению к научной работе молодых ученых. Этой цели была подчинена его педагогическая деятельность в Ростовском университете, затем в Горьковском, где он читал курсы лекций по распространению волн. В 1947–1952 гг. Л.М. Бреховских читал лекции по распространению радиоволн на Физико-техническом факультете МГУ, на базе которого в 1951 г. был организован Московский физико-технический институт (МФТИ). Это было началом педагогической работы Л.М. В течение нескольких лет он читал лекции на тему: «Распространение волн в слоистых средах» студентам физического факультета МГУ, а затем, будучи уже профессором, – один из основных курсов – «Механика сплошных сред» на кафедре акустики МФТИ, переименованной позднее в кафедру физики гидрокосмоса. С 1975 по 1997 г. Л.М. заведовал этой кафедрой, руководил аспирантами, являлся научным консультантом при подготовке докторских диссертаций. Для него характерно чрезвычайно благожелательное отношение к научным работам своих сотрудников и учеников. В результате этой огромной работы в настоящее время только в Москве работает более десяти докторов и более двадцати кандидатов физико-математических наук, воспитанных Л.М. Бреховских. К его школе принадлежит большинство ведущих специалистов в области акустики океана.

Активная научная и научно-организационная деятельность в конце 40-х – начале 50-х годов была отмечена в 1953 г. избранием Л.М. Бреховских в члены-корреспонденты Академии наук СССР.

В 1953 г. было принято решение о создании Акустического института, возглавить его было предложено Л.М. Бреховских. Помимо более широкого развития прежних исследований, проводившихся в акустической лаборатории ФИАН, были определены и новые направления, которые стали развиваться в институте. Так, была создана лаборатория акустических методов исследования океана, выросшая впоследствии в научный отдел и явившаяся базой для развития нового направления – акустики океана, теоретические основы которого были разработаны Л.М. Бреховских.

В начале 60-х годов по инициативе Л.М. Бреховских Акустический институт получил в свое распоряжение два специально оборудованных акустических научно-исследовательских судна, излучающее «Петр Лебедев» и приемное «Сергей Вавилов». По своим экспериментальным возможностям, оснащению техническими средствами, электронной аппаратурой и вычислительной техникой эти корабли были в то время самыми совершенными. Суда были предназначены главным образом для совместной работы. Установленное на них уникальное оборудование позволило проводить сопровождающиеся гидрологическими и метеорологическими измерениями (т.е. в контролируемых условиях) эксперименты по дальнему распространению звука почти во всех районах Мирового океана. Эти эксперименты показали, что для интерпретации полученных результатов в теории распространения звука нужно учитывать множество различных факторов. Таких как затухание звука в морской воде и дне океана, рассеяние волн на неровных границах жидкого слоя (поверхность и дно) и в толще воды, горизонтальная неоднородность среды и т. п.

Большую роль в интерпретации первых экспериментов по распространению звука сыграла развиваемая Л.М. Бреховских теория усредненных акустических полей в океане, соответствующих некогерентному (энергетическому) сложению лучей или мод. Были обнаружены некоторые общие закономерности усредненной структуры звукового поля, связанные с вертикальным распределением скорости звука, возможно, медленно меняющегося по трассе (“Усредненное поле в подводном звуковом канале”, Акустический журнал, 1965). Такой подход позволил получить сравнительно простые выражения для среднего поля, не учитывающие интерференцию сигналов, приходящих в точку наблюдения по различным лучам или модам (энергетическое сложение). Эти результаты оказались очень удобными для интерпретации данных по дальнему распространению звука и до сих пор широко используются на практике.

В то же время Леонид Максимович хорошо понимал необходимость применения численных методов расчета распространения звука в океане. Он всегда призывал своих сотрудников и учеников к использованию этих методов в своих исследованиях, к созданию численных алгоритмов, позволяющих проводить расчеты для наиболее близких к реальным океаническим условиям, способствовал оснащению институтов и научно-исследовательских судов современной электронно-вычислительной техникой.

Бурное развитие теории распространения звука и нарастающее число публикаций по этим проблемам в СССР и США потребовало существенной переработки монографии Л.М. Бреховских “Волны в слоистых средах”. В 1973 году вышло 2-е издание этой книги, которое так же, как и 1-е, было издано в США в 1980 г. В этой монографии, наряду с расширенным современным изложением содержания 1-го издания, освещены также новые проблемы, связанные, прежде всего, с распространением волн в изменяющейся по трассе среде.

В 60-е годы Л.М. Бреховских начинает активно работать на стыке двух наук – акустики и океанологии. Он обосновал перспективность и целесообразность широкой программы акустико-океанологических исследований, считая, что в изучении океана акустика должна играть первостепенную роль (“О роли акустики в исследовании океана”, Изв АН СССР, 1965, “О некоторых проблемах акустики океана”, Изв АН СССР, 1968). Действительно, только звуковые волны могут распространяться в толще океана на многие тысячи километров; радиоволны затухают в морской воде на расстоянии порядка сотен метров, а свет практически полностью рассеивается на протяжении нескольких десятков метров. В связи с этим им намечаются основные направления акустических исследований, результаты которых могут быть использованы в океанологии. Прежде всего, это изучение подводного распространения звука, его рассеяния, отражения от границ и поглощения, а также исследование собственных шумов океана, обусловленных морским волнением, штормами, ливнями, тектоническими процессами в дне океана и т. п. Развитие этих направлений позволит дополнить классические, как правило, контактные методы океанологических измерений дистанционными акустическими.



В своих научных работах Л.М. непосредственно обратился к задачам динамики океана, изучая взаимодействие поверхностных волн в океане, приводящее к излучению акустических волн (“Звуковые волны под водой, обусловленные поверхностными волнами в океане”, Изв. АН СССР, 1966).

В 1968 г. Л.М. Бреховских был избран академиком, в 1969 г. – академиком-секретарем Отделения океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР. Необходимость получения более детальных знаний о динамических процессах в океане потребовала проведения долговременного полигонного гидрофизического эксперимента, в результате которого была открыта вихревая структура океана. В процессе подготовки этого эксперимента его научный руководитель – Л.М. Бреховских за полгода до выхода в океан начал собирать еженедельные совещания по подготовке рейса. Обсуждались число участвующих в эксперименте организаций и научно-исследовательских судов, роль и задачи каждого из них, район и время проведения работ, геометрия эксперимента, количество необходимых буйковых станций, их расположение и глубины регистрации течений, пространственные и временные масштабы измерений, спектральные характеристики антенн различных конфигураций. В результате в эксперименте “Полигон-70”, который состоялся в 1970 г. и продолжался полгода, участвовали шесть научно-исследовательских судов; площадь акватории эксперимента была более 12 тыс. квадратных миль. Антенна из автономных датчиков была установлена в зоне Северного пассатного течения, которое считалось устойчивым и не подверженным возмущениям. Однако уже первичные результаты показали его изменчивость, причем на всех горизонтах отмечалось периодическое изменение направления течения на обратное. Наблюдаемая картина, как показал анализ полученных данных, соответствовала прохождению через полигон громадных, до 200 км в диаметре вихревых образований. Было экспериментально установлено не известное ранее явление образования в открытом океане перемещающихся синоптических вихрей, заключающееся в том, что в толще вод океана происходит формирование систем движущихся циклонических и антициклонических вихрей размерами в десятки и сотни километров и кинетической энергией, превосходящей энергию крупномасштабных течений (“Полигонный гидрофизический эксперимент в тропической зоне Атлантики”, ДАН, 1971).

Доклад Л.М. Бреховских осенью того же 1970 г. в Токио на Объединенной океанической ассамблее о предварительных результатах этого эксперимента вызвал большой интерес и стимулировал подобные исследования в открытом океане. Так, в 1973 г. ученые США провели аналогичный трехмесячный эксперимент (МОДЕ) в Саргассовом море и получили похожие результаты. В совместном тринадцатимесячном советско-американском эксперименте ПОЛИМОДЕ 1977 – 1978 гг. были обнаружены новые особенности структуры и динамики океанских вихрей. Открытие явления образования в открытом океане перемещающихся синоптических вихрей было занесено в Государственный реестр открытий СССР, а его авторам Л.М. Бреховских, В.Г. Корту, М.Н. Кошлякову и Л.М. Фомину в 1979 г. был вручен диплом.

За большие заслуги в развитии советской науки и техники и внедрение результатов исследований в народное хозяйство Л.М. Бреховских в 1971 г. был награжден орденом Ленина. Вторым орденом Ленина Л.М. Бреховских был награжден в 1975 г. за заслуги в развитии советской науки и в связи с 250-летием Академии наук СССР. В 1970 г. за научное руководство разработкой гидроакустического комплекса «Рубин» для атомных подводных лодок (головной разработчик – ЦНИИ «Морфизприбор») Леониду Максимовичу была присуждена Ленинская премия.

С 1969 г. в течение 10 лет Л.М. возглавлял в Акустическом институте Отдел акустики океана, где проводились широкомасштабные теоретические и экспериментальные исследования в области подводной акустики. Немало успехов было достигнуто коллективом этого отдела в изучении звуковых полей в океане, их модового состава, тонкой структуры, стабильности и океанологических характеристик, влияющих на законы распространения звуковых волн, в разработке методов математического моделирования звуковых полей, в решении целого ряда проблем, связанных с генерацией и физическими характеристиками собственных шумов океана, в исследовании отражения звука от морской поверхности и дна, а также рассеяния на границах и в толще океана.

Необходимость подвести итог более чем десятилетних исследований, проводимых на научно-исследовательских судах в океане, обобщить полученный коллективом огромный экспериментальный материал привела Л.М. к идее написания фундаментальной монографии, которая отобразила бы современное состояние подводной акустики. В написании монографии участвовал коллектив ведущих сотрудников его отдела (Н.С. Агеева, И.Б. Андреева, В.И. Воловов, Ю.Ю. Житковский, Ю.П. Лысанов, А.В. Фурдуев, С.Д. Чупров, Р.Ф. Швачко). В вышедшей в 1974 г. книге «Акустика океана» были охвачены все стороны акустики океана - теоретический и экспериментальный аспекты подводного распространения звука, рассеяние звука звукорассеивающими слоями, а также рассеяние от поверхности и дна, отражение от границ, особенности распространения звука с учетом изменчивости характеристик океана, собственные шумы океана. За эту монографию коллективу авторов во главе с Л.М. Бреховских была присуждена Государственная премия СССР за 1976 г.

В начале 70-х годов Л.М. Бреховских организовал группу («бригаду») сотрудников, интересующихся гидродинамическими процессами в океане. «Бригадный» метод работы, заключающийся в коллективном, очень тщательном и заинтересованном обсуждении той или другой темы, подготовленной кем-то из членов «бригады», оказался весьма результативным и позволил в короткий срок решить ряд проблем, связанных с вопросами нелинейного взаимодействия и генерации волн различной природы («О резонансном возбуждении внутренней волны при нелинейном взаимодействии поверхностных волн», Изв. АН СССР, 1972; «К вопросу об излучении инфразвука в атмосферу поверхностными волнами в океане», Изв. АН СССР, 1973; «Волны в океане», Изв. вузов. Радиофизика, 1976 и др.).

В 1978 г. Акустическое общество Великобритании и английский Институт акустики присудили Л.М. Бреховских Большую золотую медаль Рэля за выдающиеся работы в области акустики. При награждении было отмечено, что, хотя сфера научной деятельности Л.М. Бреховских обозначается обычно термином ”волновая теория”, на самом же деле его интересы весьма широки – он объединил теорию электромагнитных и акустических волн, а также акустических волн и других волновых движений в океане.

В конце 70-х – начале 80-х годов Л.М. Бреховских написал несколько крупных работ. Совместно с Ю.П. Лысановым подготовил главу по акустике океана для большой десяти томной монографии ”Океанология” (1978), которая отразила современное состояние всех разделов океанологии. Важным событием была публикация в 1982 г. монографии Л.М. Бреховских и Ю.П. Лысанова ”Теоретические основы акустики океана”, вышедшей одновременно на русском и английском языках. В книге достаточно простым языком с объяснением физики явлений и привлечением экспериментального материала изложены наиболее фундаментальные закономерности распространения звука в океане, его рассеяния на взволнованной морской поверхности и на случайных неоднородностях толщи воды. Монография оказалась востребованной студентами, аспирантами и научными сотрудниками как в СССР, так и за рубежом. Недавно (2003 г.) вышло 3-е существенно дополненное издание монографии на английском языке. В том же (1982 г.) году была опубликована книга ”Введение в механику сплошных сред”, написанная Л.М. Бреховских совместно с В.В. Гончаровым. В 1984 и 1989 гг. она была издана в ФРГ на английском языке.

Кроме научных монографий Л.М. написал также еще одну очень интересную книгу, ”Океан и человек. Настоящее и будущее” (Наука, 1987), в которой отражены его взгляд на роль океана в судьбе человечества, способы его изучения. С большим интересом читаются выдержки из его дневников, написанных во время экспедиций на научно-исследовательских судах.

В 1977 г. Л.М. Бреховских организовал Кабинет акустики океана в Институте океанологии им. П.П. Ширшова АН, который в 1978 г. был преобразован в отдел. Л.М., будучи все время неформальным руководителем отдела, официально возглавил его в 1980 г. вместе с лабораторией распространения акустических волн. Костяк отдела составили его сотрудники по Акустическому институту и ученики (Б.Ф. Курьянов, Ю.Ю. Житковский, В.М. Куртепов, А.Г. Воронович, В.В. Краснобородько и др.), а также аспиранты и студенты кафедры физики гидрокосмоса Московского физико-технического института (О.А. Годин, А.В. Моисеев, Ю.А. Чепурин и др.). Основными направлениями исследований этого отдела, по мнению Л.М., должны были быть развитие фундаментальных основ акустики океана, методов диагностики океанской среды и создание новых современных технических средств изучения океана. Им организуется ряд океанических экспедиций на судах Института океанологии, в которых он также участвует в качестве научного руководителя. По инициативе Л.М. Бреховских в Финляндии были построены два новых научно-

исследовательских судна "Академик Сергей Вавилов" (1988 г.) и "Академик Иоффе" (1989 г.), специально приспособленных для акустических исследований в океане: малозумящих и оснащенных современной вычислительной и исследовательской аппаратурой. С 1988 г. сотрудники акустических отделов Института океанологии, Института общей физики (Москва) и Института прикладной физики (Н. Новгород) начали проводить регулярные экспедиции на этих судах.

Все, кто принимал участие в экспедициях вместе с Л.М. Бреховских, получил основные практические навыки, необходимые при проведении гидроакустических исследований. В то же время Л.М. Бреховских умел создать доброжелательную обстановку в экспедициях, что также способствовало их успеху. Он организовывал у себя в каюте музыкальные вечера, где прослушивались музыкальные записи, прежде всего, классические, тонким ценителем которой был он сам. Во время заходов в иностранные порты Л.М. всегда подбирал спутников для посещения музеев, осмотра основных достопримечательностей, длительных прогулок. Он всячески поддерживал организацию экскурсий в стране пребывания. При этом со стороны казалось, что Л.М. совершенно не уставал от таких походов. Даже в семидесятилетнем возрасте он часто выглядел свежее, чем существенно более молодые его сотрудники.

Среди важнейших достижений Л.М. Бреховских и руководимого им коллектива за этот период следует отметить успешное развитие методов изучения океана с помощью созданных в лаборатории, руководимой Б.Ф. Курьяновым, полностью автоматизированных автономных акустических станций, позволяющих по-новому подойти к исследованиям анизотропии и глубинных зависимостей шумов океана. С помощью этой аппаратуры были также разработаны методы восстановления структуры слоистого дна глубокого океана на основе измерения интерференционной картины шумового широкополосного звукового поля. Исследования рассеяния звука дном океана, проводимые в лаборатории Ю.Ю. Житковского, послужили основой акустического метода разведки железомарганцевых конкреций на дне океана ("Рассеяние звука железомарганцевыми конкрециями", Акустический журнал, 1985). Еще во время работы в Акустическом институте Л.М. Бреховских с сотрудниками были найдены новые способы навигации и определения скорости судна относительно дна, основанные на получении "акустического рельефа" дна океана с помощью спускаемой с борта судна антенной решетки ("Пространственная изменчивость акустического поля, отраженного от дна океана", ДАН, 1981). На новом судне "Академик Сергей Вавилов" такая решетка была установлена в его днище. Это позволило более оперативно получать акустические изображения морского дна и, в частности, предложить новый способ привязки судна к месту на дне океана без применения акустических маяков, как это обычно делается ("Получение акустического изображения морского дна с помощью многоэлементных антенн", ДАН СССР, 1985).

В ходе экспедиций проводились также эксперименты по дальнему распространению звука в различных районах Мирового океана с помощью

разработанной в лаборатории, руководимой Л.М. Бреховских, аппаратуры: трехфункционального зонда “Триада” и 29 элементной 560 метровой вертикальной антенны. Так в 1987 г. в совместной экспедиции научно-исследовательских судов ИО АН (“Академик Курчатов”, “Витязь”) и ТОИ ДВО АН (“А.А. Виноградов”) под руководством Л.М. Бреховских были проведены акустические измерения низкочастотного звука вдоль 1100 км трассы в Индийском океане в условиях сильной пространственной изменчивости поля скорости звука (мощные фронтальные зоны, вихри). Аналогичные эксперименты также при участии Л.М. проводились и на новых судах в Центральной Атлантике (1989 г.) и Норвежском море (1990 г.). При этом много внимания уделялось разработке численных алгоритмов расчета распространения звука в океане. Результаты расчетов сопоставлялись с экспериментальными данными, анализировались различные способы представления характеристик сравниваемых полей для выработки наглядной методики интерпретации данных измерений. Детально изучались отличия численных расчетов от данных измерений, их причины и возможные пути устранения, а также степень влияния различных гидрологических факторов на процесс распространения звука в океане (“Эксперименты по дальнему распространению звука в Канарской котловине Атлантического океана”, Акустический журнал, 1990). Численное моделирование в условиях эксперимента 1989 г. на 3500 км трассе позволило связать наблюдаемые зоны относительно высокой интенсивности звука с явлением формирования слаборасходящихся пучков звуковых лучей. Аналогичный эффект был обнаружен и в других районах океана (“Слаборасходящиеся пучки звуковых лучей в Арктике”, Изв. РАН, 1995).

Ученики Л.М. Бреховских А.Г. Воронович и О.А. Годин, работающие под руководством Л.М. со студенческих лет, продолжали также развивать теоретические основы акустики океана, защитив в результате докторские диссертации. А.Г. Воронович разработал новые приближенные методы рассеяния волн на неровной поверхности (метод малых наклонов, метод фазового оператора и др.). Работы О.А. Година были посвящены использованию новых аналитических методов при решении классических задач распространения волн и учету новых факторов, влияющих на звуковые поля в океане (течения, плотностная стратификация, нестационарность среды). В результате возникла необходимость появления новой обобщающей монографии, существенно дополняющей широко известную в мире книгу Л.М. Бреховских “Волны в слоистых средах” и излагающей содержащийся в ней материал с современных позиций. Такая монография была издана в СССР (Л.М. Бреховских, О.А. Годин “Акустика слоистых сред”, 1989), в которой также представлены результаты других авторов, изложенные в едином для всей книги стиле с обширной библиографией по всем изложенным и только упомянутым вопросам. В более расширенном варианте, с включением задач распространения волн в изменяющейся по трассе среде, эта монография, в двух отдельных книгах, была также издана на английском языке в 1990 и 1992 гг. (1-е издание) и в 1998 и 1999 гг. (2-е издание).



Л.М. Бреховских постоянно призывал своих сотрудников и аспирантов к разработке новых подходов к дистанционному акустическому зондированию океана – акустической томографии океана. С этой целью Леонид Максимович еще в Акустическом институте, в руководимой им лаборатории акустических методов исследования океана (ЛАМИО), инициировал работы по систематизации накопленного за 1966–1980 гг. экспериментального и теоретического материала по влиянию крупномасштабных неоднородностей в океане на распространение звука. Эти работы продолжались и в Институте океанологии, где также были исследованы возможности диагностики таких неоднородностей по схеме линейной лучевой томографии. Леонид Максимович принимал участие в обсуждении полученных результатов, в ходе которых родилась идея поэтапного восстановления трехмерных неоднородностей среды, получая вначале оценку усредненного по глубине распределения возмущения в горизонтальной плоскости. Затем, используя это распределение, как априорную информацию о положении неоднородности, восстанавливается ее структура в каждой из вертикальных плоскостей. Позднее эта идея была использована при реконструкции структуры трехмерной внутритермоклинной линзы Средиземного моря по акустическим данным реального натурального эксперимента. В эксперименте 1990 г. в Норвежском море был также осуществлен прием тонального сигнала частотой 105 Гц на вертикальную 29-элементную антенну, гидрофоны которой позиционировались с точностью порядка 1 м. В результате обработки данных этого эксперимента удалось восстановить комплексные амплитуды звуковых мод в месте постановки антенны на дистанциях 27, 55 и 105 км. Кроме того, эти экспериментальные данные были использованы для демонстрации принципиальной возможности и эффективности восстановления поля скорости звука на трассе эксперимента методом самосогласованного поля.

Л.М. Бреховских постоянно поддерживал участие своих сотрудников в международных экспериментах по томографии океана со своей программой работ. Одним из таких проектов был эксперимент по традиционной схеме акустической томографии «ТНЕТИС-2» с 6-ю заякоренными трансиверами в Алжиро-Прованском бассейне Средиземного моря в 1994 г. В рамках этого проекта был проведен эксперимент по динамической томографии океана с движущегося судна (НИС ИО РАН «Академик Сергей Вавилов», О.А. Годин и др.). Был проведен прием звуковых сигналов с трансиверов на трехфункциональный зонд «Триада», спускаемый с борта судна в точках вдоль акустических трасс с шагом 50–60 км. Кроме того, контактными методами собиралась гидрологическая информация. Процессы обработки и интерпретации полученных данных проводились с помощью лучевого, модового и параболического приближений. Для более качественной реконструкции двумерного поля скорости звука в условиях не разрешаемых по времени поздних приходов сигнала был предложен оригинальный метод согласованного поля во временной области. Результаты инверсии на отдельных разрезах показали хорошее соответствие с данными прямых гидрологических измерений.

Сотрудники лаборатории Л.М. Бреховских (А.Н. Гаврилов и др.) активно работали в совместной российско-американской программе ACOUS (Arctic Climate Observation using Underwater Sound), в рамках которой в 1998–1999 гг. был осуществлен эксперимент по непрерывной акустической термометрии Северного Ледовитого океана на стационарной 1250 км трассе. Одним из результатов анализа явилась возможность оценки по акустическим данным не только средней по трассе температуры, но и местоположения области потепления, связанной с поступлением теплых атлантических вод на те глубины, где они создают условия сильного взаимодействия звуковых мод (“Результаты эксперимента ACOUS”, Изв. РАН, 2002).

Обработка и интерпретация данных этих экспериментов проводилась также в рамках грантов РФФИ и зарубежных фондов INTAS, CRDF, неизменным участником которых был Л.М. Бреховских.

Важным условием плодотворной научной работы является постоянное общение ученых. В 1950–70 гг., когда основные специалисты, занимающиеся этой областью науки, были сосредоточены в Москве, особых проблем с подробным обсуждением научных работ не возникало. Но по мере возникновения научных центров в различных городах СССР, часто весьма удаленных от Москвы, дефицит такого общения начал остро ощущаться. Для решения этой проблемы Л.М. Бреховских в конце 70-х годов организовал совместный научный семинар отделов акустики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова АН, Акустического института им. акад. Н.Н. Андреева, Отдела волновых явлений Института общей физики АН и Института прикладной физики АН (Н. Новгород). В работе семинара принимали участие ученые не только из указанных институтов, но также из Ленинграда (Санкт-Петербурга), Воронежа, Владивостока и других городов. Заслушивались также выступления зарубежных ученых.

Но в первую очередь дефицит общения относился к молодым сотрудникам вновь образованных научных центров, которым для более глубокого понимания возникающих перед ними проблем было важно непосредственно услышать мнение ведущих ученых-акустиков. Л.М. Бреховских предложил организовать регулярную школу-семинар «Акустика океана», первое заседание которой было проведено в 1980 г. в пансионате АН СССР в г. Звенигород (около 40 км от Москвы). Заседания школы строились в виде прочтения ведущими учеными 20–30 обзорных лекций (в течение 5 дней работы), в которых излагалось современное состояние различных проблем акустики океана и возможные пути ее дальнейшего развития. Аналогичные школы-семинары проводились вплоть до 1990 г. с двухгодичной периодичностью, после чего временно прекратились из-за трудностей финансирования советской науки в этот период. Прочитанные на школе лекции публиковались издательством «Наука» в виде сборников, оказавшихся также весьма полезными и популярными. Регулярные (каждые два года) заседания школы-семинара, совмещенные с сессиями Российского акустического общества, возобновились в 1998 году и проводятся в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Программы школ охватывают практически все основные разделы современной акустики океана. Все доклады,

принятые оргкомитетом, публиковались к моменту открытия школы. Заседание 2006 г. было посвящено памяти академика Л.М. Бреховских – основателя и постоянного председателя оргкомитета школы-семинара.

Л.М. Бреховских вел большую научно-организационную работу. Он возглавлял Комиссии по проблемам Мирового океана АН СССР; был научным руководителем проекта «Акустика» межведомственной программы «Мировой океан»; членом бюро президиума научного совета «Изучение океанов и морей и использование их ресурсов» Государственного комитета СССР по науке и технике; членом Пленума Высшей аттестационной комиссии и Пленума Комитета по Ленинским и Государственным премиям СССР в области науки и техники при Совете Министров СССР. Леонид Максимович был главным редактором журнала «Океанология» АН СССР, членом редколлегии журналов «Вестник АН СССР», «Доклады АН СССР», «Акустический журнал», «Вокруг света», а также международных журналов «Acta oceanologica» (Париж) и «Wave motion» (Амстердам). Входил в редколлегию секции “Волновые явления” издательства Шпрингер (ФРГ).

Весьма обширна деятельность Л.М. Бреховских на международной арене. В составе советских делегаций он неоднократно представлял отечественную науку на международных переговорах, конференциях и совещаниях. Он участвовал в Международной конференции по определению методов контроля над запрещением ядерных взрывов, в заседаниях совместной советско-американской комиссии по сотрудничеству в области исследований Мирового океана. Леонид Максимович являлся членом Международной акустической комиссии (МАК), представителем Международного совета научных союзов (МСНС) в Научном комитете по океаническим исследованиям (SCOR). Кроме того, Леонид Максимович был членом кураториума по премии имени А.П. Карпинского Фонда А. Тепфера (г. Гамбург, ФРГ).

В последние годы Л.М. Бреховских продолжал активно работать в науке. Он являлся Советником Президиума РАН, руководил научной школой, в состав которой входили его ученики из Акустического института, Института океанологии и МФТИ, был научным руководителем различных проектов, грантов РФФИ и зарубежных фондов INTAS, CRDF.

Л.М. Бреховских создал новое направление в науке, внес большой вклад в развитие его теории, сделал крупные научные открытия, написал несколько монографий, которые стали настольными книгами специалистов в области подводной акустики, явился родоначальником научной школы. За большие заслуги в развитии советской науки и подготовке научных кадров Л.М. Бреховских в 1987 г. был удостоен звания Героя Социалистического Труда, а в 1997 г. награжден орденом “За заслуги перед Отечеством” III степени. ЛМ был избран первым почетным членом организованного в 1991 г. Российского акустического общества, в 2002 г. ему присуждена независимая российская премия “Триумф” за значительный вклад в Российскую и мировую науку, а в 2003 г. присвоено звание почетного профессора Московского физико-технического института.

Л.М. Бреховских получил много международных наград. В 1986 г. ему была присуждена премия имени А.П. Карпинского, учрежденная фондом г. Гамбурга

(ФРГ) для советских ученых за выдающиеся работы, открытия и изобретения в области естественных и общественных наук, в 1997 г. – Медаль У. Манка Международного Океанографического общества. В 1991 г. Леонид Максимович был избран иностранным членом Национальной Академии наук США, а в 1999 г. удостоен звания Почетного члена Американского акустического общества.

### От Редколлегии журнала

Сотрудники и коллеги по Акустическому отделу благодарны общей судьбе, связавшей всех нас общими интересами, а также Институту океанологии им. П.П. Ширшова РАН, объединившего всех одной целью в многолетней научной работе, с человеком уникального склада характера, великого ученого и замечательного педагога, создавшего свою школу «Акустика океана» и воспитавшего большую плеяду учеников, несущих сегодня по всему миру поднятое им знамя неудержимого стремления к познанию океана. Сегодня всех нас объединяют общие научные интересы в той замечательной области знаний, которую мы открыли для себя благодаря Л.М. Бреховских.

### THE 100th ANNIVERSARY OF THE ACADEMICIAN LEONID M. BREKHOVSKIKH

The scientific bibliographic essay is published with the permission of the authors and the “Nauka” Publishers on the basis of materials: *Akustika neodnorodnyh sred: v 2 tomakh.* / Brekhovskikh L.M., Godin O.A.; Nauch. Sovet Programmy Fundament. Issled. Prezidiuma RAN. M.: Nauka, 2007 – (Pamjatniki otechestvennoj nauki. XX vek).

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect,  
Moscow, 117997, Russia, e-mail:  
Submitted 10.11.2017, accepted 25.12.2017*

**Keywords:** L.M. Brekhovskikh, sound scattering, the method of the tangent plane, propagation of sound waves in layered media

Scientific and biographical sketch for the 100th anniversary of Academician L.M. Brekhovskikh, the creator and head of the scientific school on ocean acoustics, who received wide international recognition, is presented. Many scientists, both in our country and abroad, including those who have never met L.M. Brekhovskikh personally, consider themselves to be his disciples. This is due to the fact that the main works of L.M. Brekhovskikh, published in Russian, English and Chinese, according to many scholars, are the main teaching guide and reference book in their research work.



## ВОСПОМИНАНИЯ О Л.М. БРЕХОВСКИХ

А.Г. Воронович <sup>1</sup>

<sup>1</sup>*NOAA, ESRL Physical Sciences Division, R/PSD, 325 Broadway, Boulder,  
CO 80305, USA, e-mail: [alexander.voronovich@noaa.gov](mailto:alexander.voronovich@noaa.gov)*  
Статья поступила в редакцию 12.05.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Когда я студентом 3-го курса пришёл в Акустический институт, моим научным руководителем стал Леонид Максимович Бреховских. К этому времени Л.М. был уже знаменитым учёным, членом АН СССР, что было высшим званием для учёного в СССР в то время. Вскоре он стал также членом Президиума АН. Очень значительную часть своего времени он был вынужден посвящать организационной работе, связанной с решением важных государственных задач и вытекающей из его выдающегося положения. Но эта сторона его деятельности была от меня, конечно, скрыта, и я взаимодействовал с Л.М. только как с учёным.



В этой небольшой заметке я даже не буду пытаться охарактеризовать научные достижения Л.М.; об этом можно было бы написать большую отдельную статью. Большинство его публикаций находило многочисленных последователей, а некоторые из них породили целые научные направления. Таким примером (пусть



и не самым значительным) является его статья в ДАН СССР, в которой он ввёл метод касательной плоскости. Этот метод явился одним из двух краеугольных камней, на которых впоследствии была построена теория рассеяния волн на неровных поверхностях.

Удивительно, как легко он был доступен своим ученикам и сотрудникам, в том числе и мне. Я плохо сознавал ценность его времени и иногда обращался к нему по пустяковым, в общем, вопросам, и, не смотря на это, никогда не знал отказа. Теперь мне вполне ясно, что в душе Л.М. всегда оставался учёным-исследователем. Но он также считал, очевидно, своим долгом всеми силами способствовать развитию тех наук, в которые он был вовлечён, а именно акустики и океанологии, и, в частности, помогать становлению молодых учёных. Л.М. организовал в Акустическом институте небольшую, как он называл её, «бригаду», которая включала в себя нескольких состоявшихся крупных учёных, таких как К.А. Наугольных и С.А. Рыбак, но также и его более молодых учеников В.М. Куртепова и В.В. Гончарова. Мне также посчастливилось участвовать в её работе. «Бригада» интересовалась нелинейными процессами, связанными с распространением волн. Как и всегда, Л.М. точно почувствовал перспективность этого направления. На «бригаде» участники докладывали как свои работы, так и реферировали появившиеся в печати интересные статьи. По результатам работы «бригады» было сделано несколько важных публикаций. Участие в «бригаде» дало мне очень много.

Л.М. организовал несколько очень популярных семинаров. Одним из них был семинар по геофизической гидродинамике, проходивший в Институте физики атмосферы АН СССР в Пыжевском переулке. Доклады на этом семинаре делали как очень крупные учёные, такие как А.М. Обухов, А.С. Монин, так и начинающие молодые. Другой семинар, проходивший в Институте океанологии, был посвящён акустике океана.

Оба семинара очень широко посещались. Эти семинары задавали «тон», т.е. уровень соответствующей научной дисциплины, который в обоих случаях был, по моему мнению, весьма высоким, вполне на уровне хороших международных стандартов. Нельзя не вспомнить также школу по Акустике океана, которая существует и успешно функционирует и по сей день. Удивительно, насколько такого рода начинания Л.М. хорошо «работали». Едва ли это можно объяснить просто случаем или влиянием высокого положения, которое Л.М. занимал. Тут играло роль особое «чутьё» на хорошую науку, свойственное, по-видимому, по-настоящему выдающимся учёным.

В конце 1970-х годов Л.М. перешёл работать в Институт океанологии им. П.П. Ширшова и организовал в этом институте Отдел акустики океана, состоявший из четырёх лабораторий. Одной из этих лабораторий, занимавшейся вопросами распространения звука, руководил поначалу он сам. Это была очень маленькая лаборатория, в которую помимо Л.М. входило ещё три человека, включая меня. Отдел акустики океана быстро укреплялся и вскоре стал проводить научные экспедиции. Для изучения дальнего распространения звука необходимо иметь как минимум два

судна, и Л.М. сумел организовать заказ на два специализированных акустических научных судна: «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе». Эти суда были построены в Финляндии. «АИ» был излучающим, а «АСВ» – приёмным судном. Суда эти были великолепно оборудованы и совершенно уникальны. Можно только догадываться, насколько сложно было организовать этот очень дорогостоящий проект, но Л.М. это удалось.

С помощью этих судов в конце 1980-х и начале 1990-х годов было проведено несколько очень интересных экспериментов, в том числе по томографии океана – актуальном в то время направлении. Л.М. являлся научным руководителем нескольких рейсов с участием этих судов. Было очень интересно наблюдать подход Л.М. к планированию и проведению сложных экспериментов, его способность быстро вникнуть в новую проблему, охватить её в целом, отделять главное от второстепенного.

Л.М. очень любил классическую музыку, особенно Бетховена. В одном из рейсов он организовал клуб любителей музыки. На пароходе была небольшая коллекция пластинок, и мы собирались раз в неделю и прослушивали какое-либо произведение. Это очень помогало скрашивать будни рейсов. В одном из рейсов с нами была группа студентов МФТИ. У них были записи популярных среди студентов песен Макаревича и группы «Аквариум». Мы показали эти записи Л.М., и он слушал их с большим удовольствием. Было отчасти удивительно видеть эту способность воспринимать музыку совершенно другого поколения, чрезвычайно далёкую от привычной для него как по форме, так и по содержанию.

При общении с Л.М. никогда не возникало ощущения дистанции, разделяющей большого учёного, занимающего исключительное положение, и его собеседника, который занимал, возможно, значительно более скромное положение. Я уверен, что это не было отрепетированной позой, хорошо скрывающей ощущение собственной значительности. Если бы это было так, то за 25 лет моего опыта общения с Л.М. это когда-нибудь бы да обнаружилось. Но я не наблюдал проявления высокомерия с его стороны ни единого раза. Я уверен, что влияние Л.М. на его друзей и коллег, как учёного и как человека, будет ощущаться прямо и косвенное ещё очень долго.

## MEMORYIS ABOUT L.M. BREKHOVSKIKH

A.G. Voronovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NOAA, ESRL Physical Sciences Division, R/PSD, 1325 Broadway, Boulder, CO 80305, USA,  
e-mail: [alexander.voronovich@noaa.gov](mailto:alexander.voronovich@noaa.gov)  
Submitted 12.11.2017, accepted 25.12.2017

This note contains recollections of one of L.M. Brekhovskikh former students and then colleague, who worked in the Institutes of Acoustics and Oceanology under his guidance for about 25 years.

My communications with L.M. started in 1969, when as a third year student I started research in the Institute of Acoustics with L.M. being my scientific adviser and mentor. This note is by no means an attempt to characterize his scientific achievements; this could be a subject of special paper. Most of his scientific papers found numerous followers, and many of the papers opened new frontiers in science. An example of this (perhaps not the most important) is the method of tangent plane which he introduced in the beginning of fifties and which became one of two cornerstones of the theory of wave scattering from rough surfaces.

In the beginning of seventies L.M. was already outstanding, worldwide famous scientist. He was a member of the Academy of Science and its Presidium. Significant portion of his time was devoted to the organizational duties linked to solutions of the problems of State importance. It is surprising, how easily he was nevertheless accessible to his students and colleagues. Still, in his soul he always remained a research scientist, and he considered this to be his important duty to help young scientists starting their own scientific careers.

L.M. has organized a few important seminars. One of them was the seminar on Geophysical Hydrodynamics; the other the seminar on Ocean Acoustics. Both seminars were widely attended by scientists from the whole country and set up standards for the level of research in this areas. I believe that this level was rather high, in full compliance with good international standards. He also organized a School of the Ocean Acoustics which is still prosper.

In the eighties L.M. organized in the Institute of Oceanology a division of the Ocean Acoustics and became his director. To perform the research on sound propagation in the ocean, by its initiative in Finland were built two specialized acoustical research vessels: “Academic Sergey Vavilov” and “Academic Ioffe”. The vessels were exceptionally well equipped and absolutely unique. With their help were conducted a few important experiments, in particular on the ocean tomography: an active area of research at this time.

L.M. loved classical music, especially Beethoven. But he also was opened to the contemporary music which was popular among his students. It was somewhat surprising to see such an open-mindedness toward music which was so far away from what he used to both in its content and form.

I am sure that the direct and indirect influence of L.M.’s personality on his friends and colleagues will be felt for a very long time.

**АКАДЕМИК Л.М. БРЕХОВСКИХ В  
ОТДЕЛЕ АКУСТИКИ ОКЕАНА ИО РАН**

**В.В. Гончаров<sup>1</sup>, А.И. Веденёв<sup>1</sup>, Т.И. Цыплакова<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [gvv@ocean.ru](mailto:gvv@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 10.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Статья посвящена воспоминаниям о периоде жизни Л.М. Бреховских, когда он возглавлял Отдел акустики океана в Институте океанологии РАН и исследованиям, которые были инициированы им или реализованы под его руководством. Отмечается доброжелательное и внимательное отношение Л.М. к своим сотрудникам и ученикам, организация постоянного общения ученых разных поколений (в формате школы-семинара «Акустика океана»), что являлось залогом плодотворной научной работы коллектива. Представлены некоторые значимые, по мнению Л.М., результаты акустических экспериментов в океане на научно-исследовательских судах Академии наук: обнаружение слаборасходящихся лучевых пучков (1989–1990); эксперименты по акустической томографии как дна океана (пассивная томография 1980), так и водной толщи (1989–1994); обработка данных международного эксперимента (1998–1999) ACOUS.

Л.М. был одним из первых, кто осознал, что акустические методы важны для понимания и количественной оценки физических процессов в океане и в экологии – как средство изучения эффектов воздействия промышленного шума на морскую биоту. Часть исследований, инициированных Л.М. Бреховских, продолжается в Акустических лабораториях Института океанологии РАН и в настоящее время. А именно:

- исследования воздействия промышленных акустических шумов на морских млекопитающих у берегов о. Сахалин;
- пассивная томография океана с использованием окружающего шума океана и по шумам удаленного судоходства по данным международного эксперимента NPAL в Тихом океане, эксперимента 2012 г. во Флоридском проливе (О.А. Годин и др.);
- локальная акустическая томография мелкого моря (эксперименты в Голубой бухте, Геленджик, 2009 и последующие годы).

**Ключевые слова:** Л.М. Бреховских, пассивная акустическая томография, международные эксперименты NPAL, ACOUS, эффекты промышленного шума на морскую биоту

В этом 2017 г. исполнилось бы 100 лет со дня рождения Леонида Максимо-вича Бреховских, выдающегося ученого с мировым именем, создавшим новое направление в науке – акустика океана, воспитавшим несколько поколений ученых и оставившим после себя большой багаж знаний в области акустики и океанологии.

Эта статья не является биографическим очерком о ярком жизненном пути выдающегося ученого и человека Л.М. Бреховских, мы просто хотели бы вспомнить о периоде его работы в Институте океанологии РАН и связанных с экспериментами

в океане работах акустических лабораторий (Отдела акустики океана), которые Леонид Максимович считал нашими важными достижениями. Но вначале мы просто не можем не отметить его выдающийся вклад в мировую науку.

Л.М. Бреховских внес большой вклад в развитие теории в области акустики и океанологии и написал свыше 170-ти научных трудов и 20-ти монографий, среди которых особое место занимает монография «Волны в слоистых средах», 1957 и 1973 гг., изданная также в США и Китае и ставшая, по мнению многих ученых как в нашей стране, так и за рубежом, их настольной книгой. До настоящего времени пользуются большой популярностью его книги: «Теоретические основы акустики океана» (1982 г.) в соавторстве с Ю.П. Лысановым., «Введение в механику сплошных сред» (1982 г.) совместно с В.В. Гончаровым, а также фундаментальная монография «Акустика слоистых сред», 1993 г. (совместно с О.А. Годиным). Все эти монографии неоднократно переиздавались в расширенном варианте как в России, так и за рубежом.

Важнейшими в его наследии стали два открытия – подводного звукового канала и синоптических вихрей в океане.

В 1946 г. Леонид Максимович, анализируя результаты опытов Л.Д. Розенберга и Н.И. Сигачева, проведенных в Японском море совместно с другими специалистами из Военно-Морского флота, теоретически объяснил явление подводного звукового канала, которое было всесторонне изучено в его последующих теоретических и экспериментальных исследованиях. Именно это открытие имело далеко идущие последствия для акустических исследований во всем мире и ознаменовало возникновение новой дисциплины – акустики океана. Л.М. Бреховских был среди первых, кто понял, что акустические методы могут сыграть важную роль в понимании и количественном описании физических процессов в океане.

В 60-е годы Л.М. начинает активно работать на стыке двух наук – акустики и океанологии. Он обосновал перспективность и целесообразность широкой программы акустико-океанологических исследований, считая, что в изучении океана акустика должна играть первостепенную роль. В 1970 г., совместно с В.Г. Кортон, М.Н. Кошляковым и Л.М. Фоминым, им было открыто явление образования синоптических (мезомасштабных) вихрей в открытом океане. Это решительно изменило существовавшие в то время представления, будто в океане преобладает стационарная крупномасштабная циркуляция. Было выяснено, что мезомасштабные явления концентрируют более чем 90% кинетической энергии океана. Это открытие стало одним из самых крупных в истории науки об океане.

За большие заслуги в развитии советской науки и техники, вклад в мировую науку Л.М. Бреховских был удостоен множества правительственных наград и премий – в 1987 г. удостоен звания Героя Социалистического Труда, трижды награжден Орденом Ленина, был лауреатом Государственной, Сталинской, Ленинской и ряда международных премий.

Начать же хотелось бы с воспоминаний некоторых его учеников об отношении Л.М. к ним и другим сотрудникам. Л.М. стал научным руководителем (и фактически



оставался им все остальные годы), когда мы, студенты 3-го курса МФТИ (Куртепов В.М., Гончаров В.В., Воронович А.Г., Годин О.А. и др.), пришли в Акустический институт, а затем, уже в ИО РАН, пришли и другие молодые сотрудники (Веденев А.И., Моисеев А.А., Харькин С.А. и др.). Удивительно, как легко можно было встретиться с ним как его сотрудникам, так и совсем еще молодым студентам. При общении с Л.М. никогда не возникало ощущения дистанции, разделяющей его, большого учёного, академика, и его собеседников. Он мог терпеливо и с доброжелательным вниманием выслушивать и обсуждать наши (часто бредовые) идеи.

Для того чтобы помочь становлению молодых учёных, Л.М. устраивал общие встречи своих студентов и аспирантов, на которых любой из нас мог рассказать о своих работах и возникающих проблемах, обсудить их и т. п. В начале 70-х годов Л.М. организовал в АКИНе небольшую группу («бригаду», как он её называл) из 6–8 своих сотрудников и студентов (аспирантов), интересующихся нелинейной теорией распространения волн различной природы (прежде всего, конечно, волн в океане). На заседаниях этой группы ее участники докладывали свои работы, рассказывали о новых интересных статьях, появившихся в печати, слушали лекции приглашенных Л.М. известных ученых из разных городов. Такой метод работы, по нашему мнению, был достаточно результативным и очень помог нам (молодым участникам этой группы В.М. Куртепову, А.Г. Вороновичу, В.В. Гончарову) в дальнейшей научной работе.

Такие доброжелательные взаимоотношения между собой и со студентами, аспирантами и сотрудниками других руководителей, стремление помочь сохранялись и в неформальной обстановке. Мы часто в коридорах и других подобных местах обсуждали свои проблемы, методы возможного их решения и т. п. Были хорошо осведомлены о работах друг друга. Это, например, помогло тем из нас, кто в начале 1980-х годов пришел в ИО РАН, создать комплекс программ по распространению звука в океане как на институтских, так и на корабельных ЭВМ.

Л.М. хорошо понимал, что условием плодотворной научной работы является постоянное общение ученых, прежде всего, важного для молодых сотрудников из разных научных центров нашей обширной страны от Калининграда до Владивостока. Поэтому в конце 70-х годов прошлого века им была организована школа-семинар «Акустика океана», которая регулярно проводится и в настоящее время. Но хотелось бы отметить, что Л.М. называл это мероприятие именно «школой», на которой известными учеными должны быть прочитаны 20–30 лекций по различным проблемам акустики океана, прежде всего, предназначенных для молодых ученых. Обсудить эти проблемы и рассказать о своих работах они могли бы на дополнительных заседаниях. Именно таким и был формат первых 6-ти Школ (1980–1990 гг.), после чего они временно прекратились из-за малого финансирования науки в 90-е годы. Этому, по-видимому, также способствовали и объективные причины: дефицит молодых ученых и др. Возобновились Школы в 1998 г., но уже в виде обычных конференций (около сотни устных и стендовых докладов

и 4–6 пленарных, которые по традиции назывались лекциями). Прочитанные лекции на первых 6-ти школах публиковались в издательстве «Наука», а труды 7–15 школ – в издательстве «ГЕОС». Кроме того, имеется электронная версия трудов всех школ: с 1-й по 14-ю на CD-диске и 15-й на сайте ИО РАН, где, возможно, следует разместить и первые 14, чтобы напомнить о некоторых изложенных в них проблемах (в том числе и забытых), которые могут быть решены на современном этапе развития науки и техники.

Переходя к работам в Отделе акустики океана ИО РАН, отметим основные этапы его создания:

1977 – создан кабинет акустики, основная задача – разработка автономных систем обнаружения на основе совместных работ с СахКНИИ;

1978 – по совместному решению директора Института Мони́на А.С. и академика-секретаря Отделения Бреховских Л.М. на основе кабинета акустики создан Отдел акустики океана. По решению Президиума АН СССР, Институту целевым образом для создания Отдела акустики было передано 60 единиц (человек);

к 1980 г. Отдел акустики океана был укомплектован, в значительной степени специалистами из АКИН. Зав. отделом стал академик Бреховских Л.М. Для проведения научных исследований по различного рода вопросам акустики океана в отделе созданы три лаборатории: Лаб. шумов и флуктуаций звука в океане (ШИФ, Курьянов Б.Ф.), Лаб. рассеяния и отражения звука (РОЗ, Житковский Ю.Ю.) и Лаб. распространения акустических волн (РАВ, Бреховских Л.М.).

По инициативе Л.М. Бреховских Отдел акустики взял большую оборонную работу по научному обоснованию и построению основ новой автономной скрытой системы обнаружения в любом районе океана с передачей данных по гидроакустическому каналу (тема «Флора»). Были разработаны теоретические основы этой системы, разработаны и изготовлены автономные донные системы приема и обработки акустических данных (всего изготовлено 6 различных типов донных станций), проведены более 10 научных экспедиций в различных районах Мирового океана, в которых исследовались различные проблемы акустики океана, а также проведен ряд успешных испытаний системы обнаружения в открытом океане, в которых впервые для этой цели были использованы автономные вычислительные комплексы. К 1990 г. работы по прикладной тематике были практически прекращены, и Отдел акустики ИО РАН продолжил заниматься фундаментальными научными исследованиями по тематике лабораторий.

Хотелось бы еще раз отметить, что такое же доброжелательное и внимательное отношение Л.М. к своим сотрудникам и ученикам, как в Отделе акустики океана ИО РАН, сохранилось также и в рейсах на НИС, которые регулярно проводились с начала 1980-ых годов до 1994 г. Л.М. часто приглашал нас (на чашку чая и кофе, как он говорил), чтобы обсудить полученные результаты и методику постановки проводимых экспериментов в океане. Хотелось бы отметить также способность Л.М. быстро вникнуть в новую проблему в целом, выделить в ней основное, что, несомненно, помогало планированию и проведению сложных акустических экспериментов в океане и их интерпретации.

В экспедициях проводились, в том числе, и эксперименты по дальнему распространению звука с помощью разработанного и созданного в лаборатории РАВ (В.Г. Селиванов и др.) трехфункционального зонда «Триада» (акустический сигнал, глубина, скорость звука) и 29-элементной 560-метровой позиционируемой вертикальной антенны (Средиземное море, Индийский и Атлантический океаны). Остановимся сначала на некоторых результатах эксперимента по дальнему распространению звука в Канарской котловине Атлантического океана (1989 г.) на двух трассах: Т1 ~ 1125 км и Т2 ~ 3496 км. Поле скорости звука вдоль этих трасс показано на рис. 1.

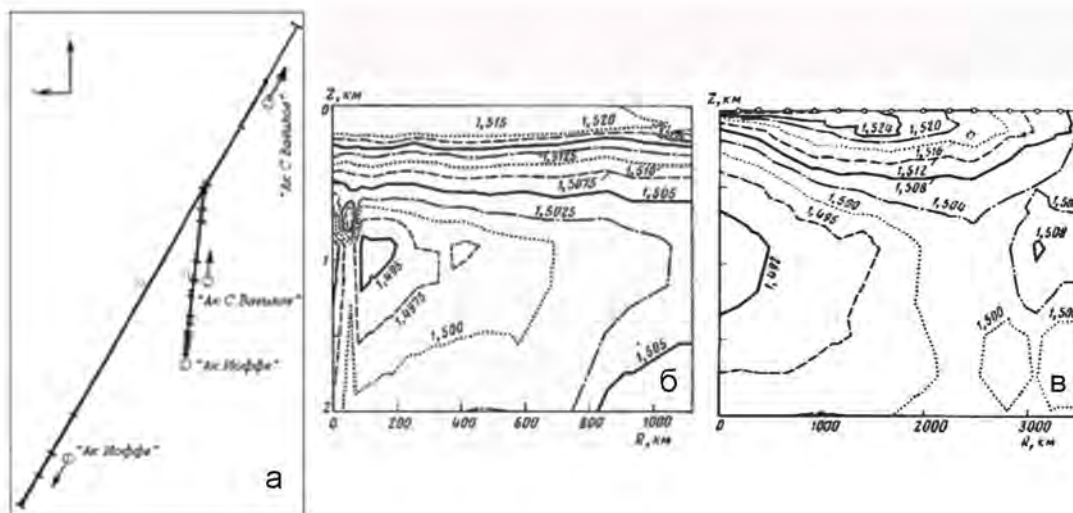


Рис. 1. Схема эксперимента: а – поле скорости звука вдоль трассы 1. Восстановленная линза в начале трассы; б – поле скорости звука вдоль трассы 2.

Звуковой сигнал частоты 137 Гц излучался НИС «Академик Иоффе» и принимался зондом «Триада», спускаемым с борта НИС «Академик Сергей Вавилов», при его последовательном все большем удалении от источника. Поскольку зондом «Триада» измерялись вертикальные профили как звукового сигнала, так и скорости звука, то за время перехода к следующей точке измерения проводился численный расчет акустического поля, который сравнивался с полученным в эксперименте. К нашему удивлению, уже на 1-м шаге (60 км от источника) было обнаружено их существенное различие, которое удалось устранить введением в численный расчет некоторой неоднородности типа линзы средиземноморской воды. К сожалению, из-за дефицита времени не удалось вернуть судно назад и прямыми измерениями описать эту неоднородность, но, тем не менее, Л.М. считал этот факт нашим первым томографическим восстановлением среды.

Л.М. также считал значимым обнаружение в этом эксперименте пучков лучей, названных нами слаборасходящимися (СПЛ), – явления, приводящего к появлению зон относительно высокой интенсивности звука на вертикальных разрезах и связанных с экстремумами зависимости длины цикла лучей от их угла выхода из источника. На верхнем рисунке красными линиями показаны границы (огibaющие)

СПЛ и синими – фонового пучка той же угловой ширины. На нижнем рисунке представлены зависимости от дистанции усредненной интенсивности звука в этих пучках (тем же цветом). Подобный эффект был обнаружен и в Норвежском море (экспедиция 1990 г.), в Арктике (СЛО) и в других районах океана (рис.2).

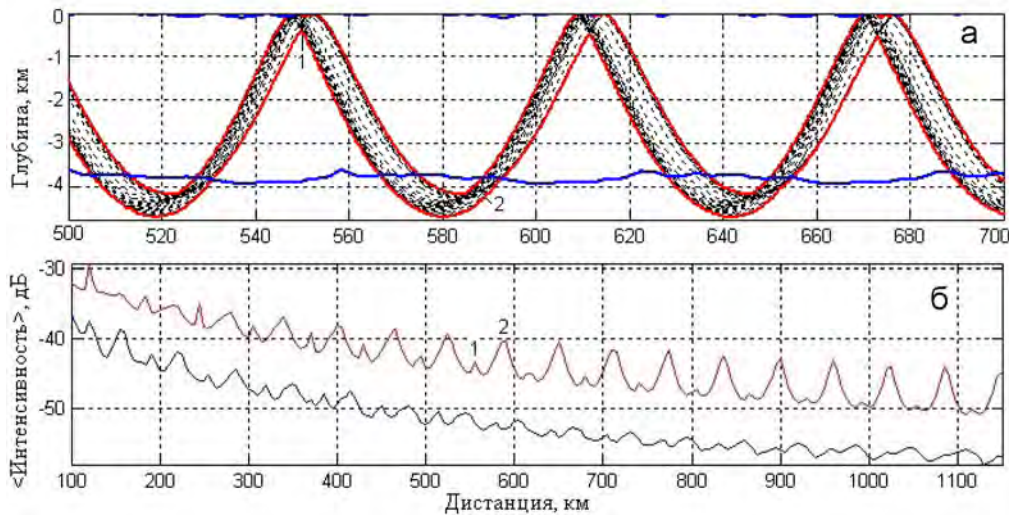


Рис. 2. Слаборасходящийся пучок лучей ( $-11^\circ$ ,  $-9^\circ$ ) – красные линии и фоновый ( $-8^\circ$ ,  $-6^\circ$ ) – синие: а – границы (огibaющие) лучевых пучков; б – средняя интенсивность звука в пучках.

Л.М. также высоко оценивал первую успешную попытку динамической акустической томографии неоднородностей водной толщи с движущихся судов при помощи протяженной вертикальной антенны на тональном сигнале (Норвежское море, 1990 г., суда «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе»). Проводилась модовая декомпозиция экспериментально измеренного поля, томографическая коррекция среды по методу согласованного поля (см. левый рисунок), а также восстановление местоположения источника звука по корреляции экспериментально измеренного и рассчитанного звуковых полей на вертикальной антенне (правый рисунок). При этом положение максимума функции корреляции, рассчитанной для восстановленной среды (красная линия), существенно ближе к измеренному расстоянию между источником звука и антенной (105 км) (рис. 3).

Экспедиция 1990 г. фактически оказалась последней для проведения нашими силами полноценных акустических экспериментов. Начиная с 90-х годов, стало невозможным организовать совместный рейс двух НИС. Поэтому Л.М. изыскивал возможности участия своих сотрудников в международных томографических экспериментах. Одним из таких проектов был эксперимент THETIS-II с 6-ю стационарными трансиверами (приемно-излучающими системами) в Алжиро-Прованском бассейне Средиземного моря. Сотрудники лаборатории РАВ в 1994 г. приняли участие в этом эксперименте во время рейса НИС «Академик Сергей Вавилов», на котором зондом «Триада» принимался звуковой сигнал с трансиверов во многих точках района эксперимента, что позволило существенно дополнить



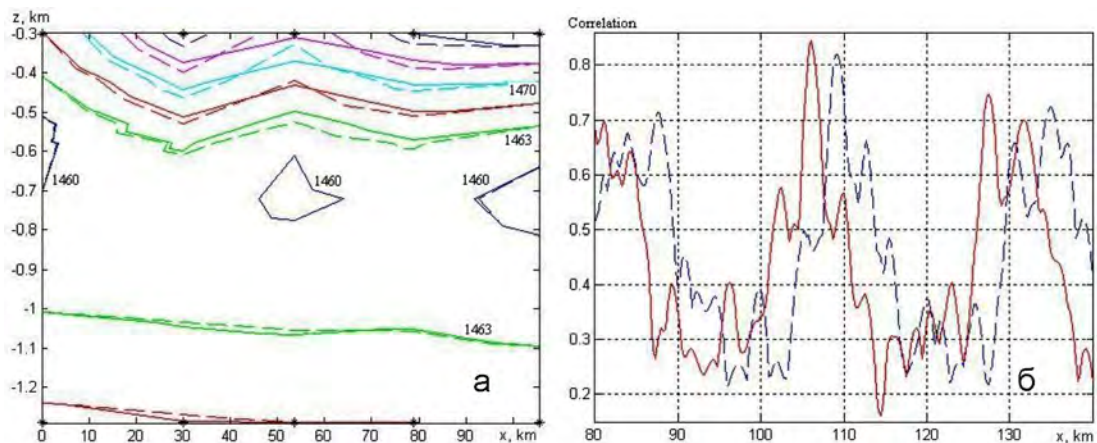


Рис. 3. Поле скорости звука, измеренное – штрихи (а). Восстановление положения источника звука (б).

результаты эксперимента (динамическая томография). Результатом измерений стало доказательство того факта, что перемещающееся внутри стационарного полигона приемное судно существенно увеличивает пространственное разрешение томографической схемы, что позволяет обнаружить и исследовать даже такие неоднородности, как внутритермоклинный вихрь (линза). Восстановление этой неоднородности проводилось по рожденной при обсуждении с Л.М. («за чашкой чая») теоретической идее поэтапной реконструкции трехмерных неоднородностей среды: получение усредненного по глубине возмущения в горизонтальной плоскости (1-й этап), затем восстановление структуры неоднородности в различных вертикальных плоскостях, используя полученные на 1-м этапе данные как априорные (2-й этап). Эта идея была высказана и, кажется, упомянута в одной из наших публикаций за несколько лет до этого, но экспериментальная возможность проверить ее работоспособность появилась только в этом эксперименте. Результаты восстановления представлены на следующем рисунке, где по вертикали отложена глубина в метрах, а по горизонтали – географические координаты (рис 4).

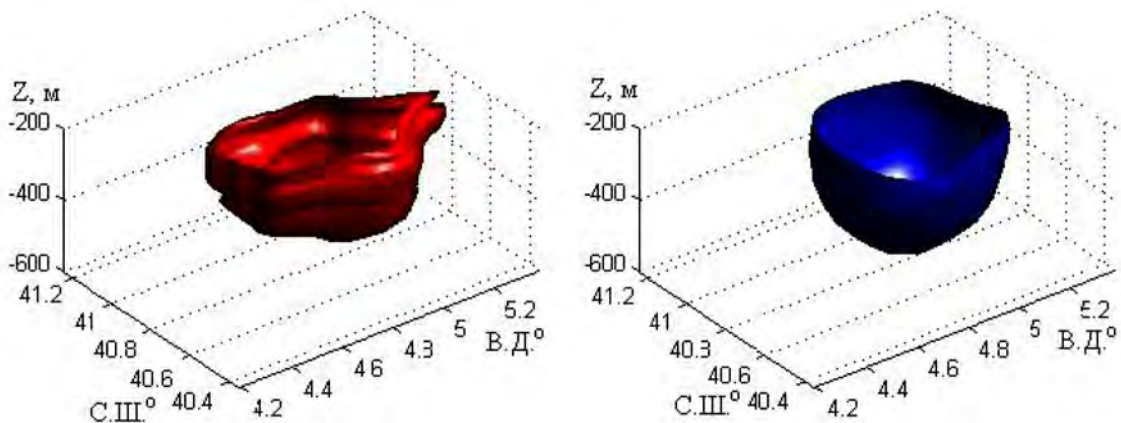


Рис. 4. Изоповерхности, соответствующие значению вариации скорости звука в линзе – 0.75 м/с. Слева – эксперимент, справа – восстановление.



Лаборатория РАВ при содействии Л.М. также принимала участие в международном эксперименте ACOUS (Arctic Climate Observation using Underwater Sound): наблюдение климата Арктики с использованием подводного звука, 1998–1999 гг.) на 1250 км стационарной трассе в СЛО от Земли Франца-Иосифа до моря Линкольна. Сотрудник нашей Лаборатории А.Н. Гаврилов участвовал в установке излучателя звука и вместе с другими сотрудниками Лаборатории – в обработке данных эксперимента, предоставленных нам организаторами проекта. В результате обработки этих данных было зафиксировано дальнейшее потепление слоя Атлантических вод Арктического бассейна. Кроме того, было обнаружено значительное изменение в атлантических водных массах, которое произошло в бассейне Нансена к северу от пролива Франц-Виктория в августе–декабре 1999 г. (см. рисунок). Эти изменения проявились на принимаемом сигнале в виде появления 2-го отклика 1-й моды, который мог возникнуть из-за сильного взаимодействия звуковых мод, обусловленного сближением их дисперсионных зависимостей, вызванным перестройкой профиля скорости звука в двухволноводный. Заметим, что такой же эффект имеет место и при распространении волн любой другой природы. В наших численных экспериментах он наблюдался для внутренних волн. Его экспериментальное подтверждение мы впервые получили именно при обработке данных эксперимента ACOUS. Использование разности времен прихода между отдельными откликами 1-й звуковой моды и позволило определить область на звуковой трассе, где эта мода сильно взаимодействует со 2-й модой, а затем томографическими методами восстановить показанную на рисунке структуру поля скорости звука в этой области (рис. 5).

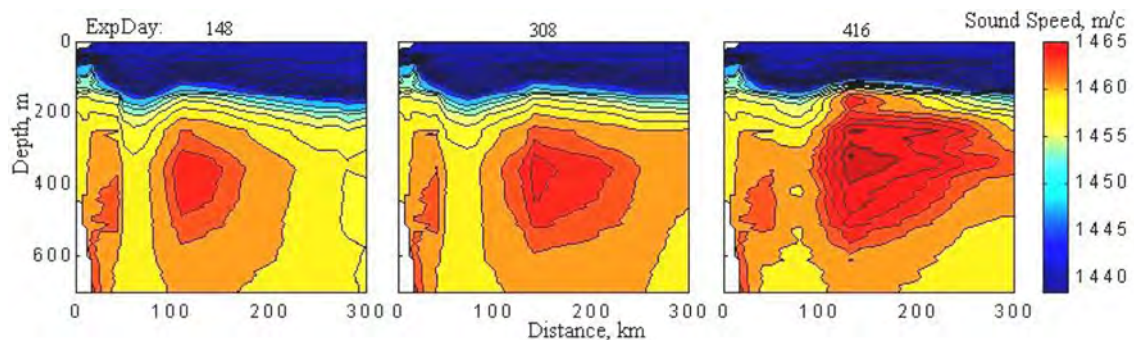


Рис. 5. Восстановленное изменение поля скорости звука на начальном участке трассы.

Было высказано предположение, что именно в виде таких дискретных пятнообразных объектов более теплые воды Северной Атлантики поступают в СЛО через пролив Фрама. Насколько нам известно, этот вывод был косвенно подтвержден проведенными учеными Германии расчетами динамики этих вод в СЛО.

Это была одна из последних работ, в которой Л.М. принимал активное участие. В дальнейшем в акустических лабораториях ИО РАН продолжались исследования по различным направлениям диагностики морской среды акустическими методами. Л.М. был одним из первых, кто понял, что эти методы также важны в понимании и

количественном описании физических процессов в океане. Он всегда поддерживал так называемый метод пассивной акустической томографии, когда не требуется специальной постановки зачастую весьма дорогих акустических экспериментов, а попутно получая необходимые данные при проведении других исследований.

Например, еще в 1980-ых годах в Лаборатории шумов и флуктуаций звука была разработана методика оценки профиля скорости звука в донных осадках, основанная на специальной обработке шумового сигнала уходящего судна, принятого установленной им автономной донной станцией (АДС, см. верхний правый рисунок). В спектре зарегистрированного на дне сигнала наблюдается характерная картина интерференционных линий (верхний левый рисунок), сформированная пришедшими по различным путям сигналами. На текущей функции автокорреляции принятого сигнала (нижний левый рисунок) хорошо виден так называемый разностный годограф зависимости разности времен прихода сигналов от времени эксперимента (дистанции от судна до АДС). Эти годографы и позволяют получить оценку профиля скорости звука в донных осадках, представленную линиями на правом нижнем рисунке (для двух районов установки АДС). Значки соответствуют данным сейсмического зондирования и глубоководного бурения в этих районах (рис.6).

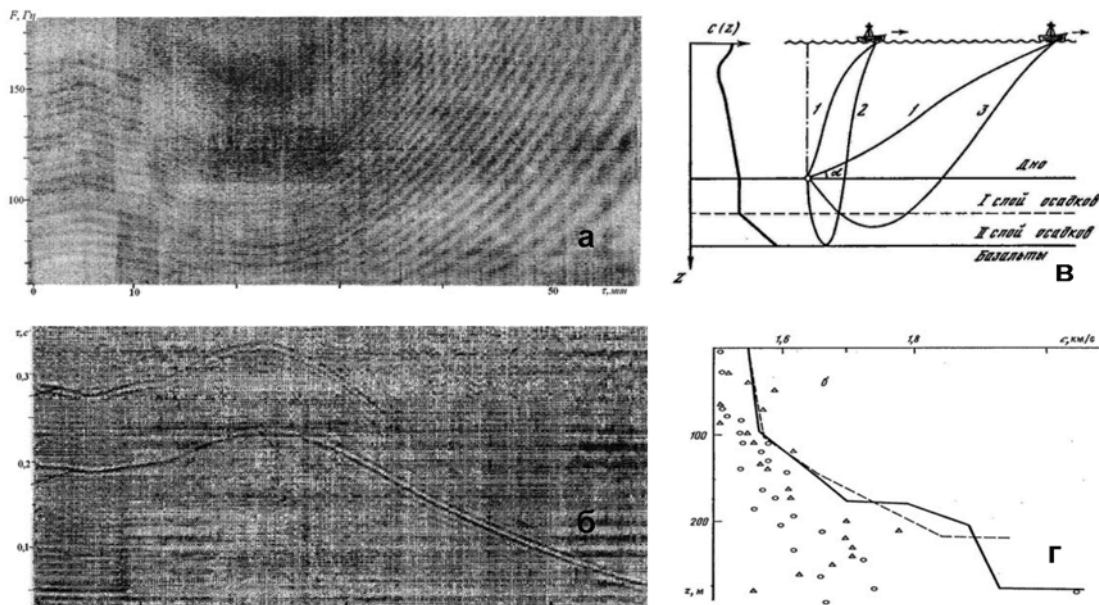


Рис. 6. а – текущий спектр сигнала; б – текущая функция автокорреляции сигнала; в – схема эксперимента; г –восстановление профиля скорости звука в донных осадках.

Если для восстановления профиля скорости звука в осадочных слоях достаточно разового эксперимента с уходящим от АДС судном, то для диагностики временных изменений параметров водной среды можно использовать естественные шумы океана и шумов удаленного судоходства. Теория, восходящая еще к работам С.М. Рытова 1967 г. (тепловые шумы), предсказывает, что взаимная корреляционная функция идеально диффузного, случайного шума, измеренного в двух точках в

неоднородной среде, соответствует функции Грина, описывающей распространение волн во встречных направлениях между этими точками. Т. е. содержит всю информацию о среде, которую можно получить при расположении трансиверов в рассматриваемых точках. В океане шум обладает направленностью, его уровень меняется с глубиной, а детальная информация о расположениях источников шумов, как правило, недоступна. В таких условиях восстановление точных функций Грина по шумам принципиально недостижимо, но в 2006–2010 гг. в ряде теоретических работ Б.Ф. Курьянова и О.А. Година было показано, что возможно определение времен распространения лучей или нормальных волн между рассматриваемыми точками.

В 1998–1999 гг. в северо-восточной части Тихого океана был проведен NPAI Billboard Array Experiment с целью изучения дальнего распространения звука. Попутно, естественно, было измерено и шумовое поле. Данные этого эксперимента P.F. Worcester любезно предоставил О.А. Годину, с которым мы работали по проекту CRDF-РФФИ 2011–2012 гг. В результате их взаимно-корреляционной обработки и были получены времена распространения звуковых сигналов от элементов одной антенны к другой (см. левый рисунок) с точностью, достаточной для реализации пассивной акустической томографии. На правом рисунке показаны некоторые результаты инверсии этих данных по линейной лучевой томографической схеме Манка (рис. 7).

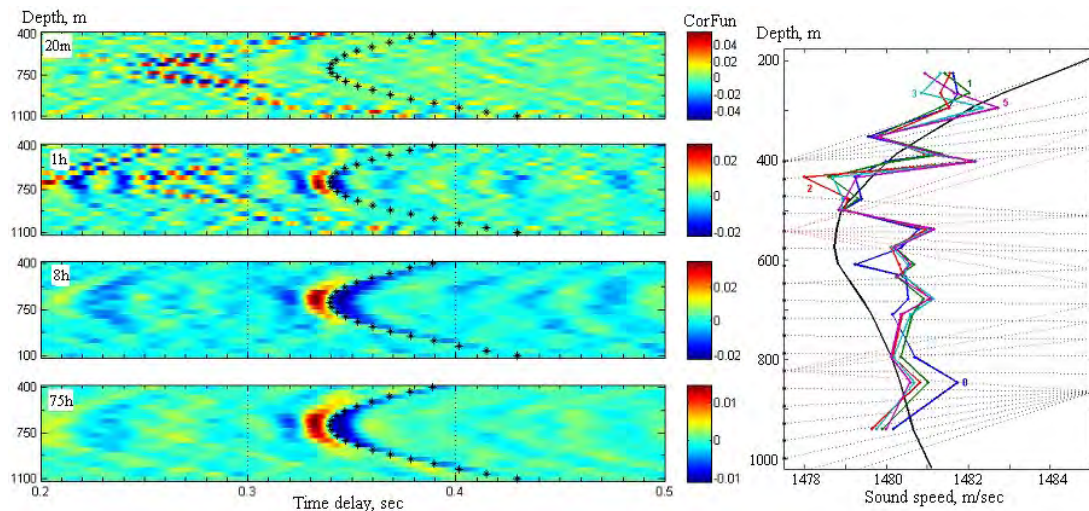


Рис. 7. Слева: оценки функции взаимной корреляции шумов океана для различных времен осреднения. Крестики – рассчитанные времена распространения звука между каждой парой гидрофонов. Справа: результаты инверсии с использованием различного числа лучей между гидрофонами антенн, черная линия – среднегодовой профиль скорости.

Задача пассивной томографии усложняется в мелководных районах, когда на шумовое поле существенно влияет структура морского дна. Исследование возможностей ее использования была проведена на основе экспериментальных данных, полученных в 2012 г. во Флоридском проливе (О.А. Годин и др.) от



двух разнесенных по горизонтали на 5.01 км автономных приемных систем, установленных вблизи дна. Функция взаимной корреляции шумового поля, рассчитанная в полосе 20–70 (с усреднением около шести дней), показана на левом верхнем рисунке (данные переданы нам О.А. Годиным в рамках совместного гранта ONRG, 2015–2016 гг.). Согласно теории, эта функция соответствует отклику при распространении звука в противоположных направлениях между гидрофонами. На нижнем левом рисунке эти отклики при распространении против и вдоль течения показаны синей сплошной и красной штриховой линиями соответственно (рис.8).

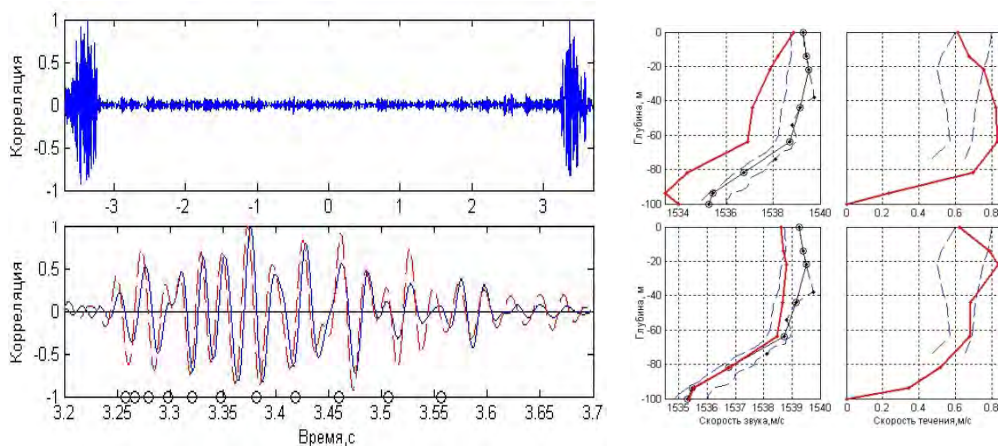


Рис. 8. Функция взаимной корреляции шума (вверху) и ее участки при распространении по (сплошная синяя линия) и против (красная штриховая) течения (внизу).

Инверсия (ЛЛТМ) экспериментальных данных. Восстановленные профили – красные линии, исходные – «о», штрихи – интервалы измеренных в эксперименте. Внизу – со слоем осадков, вверху – без.

Там же кружками «о» отмечены рассчитанные времена прихода собственных лучей в среде со среднеклиматическим профилем скорости звука без течения. Результаты инверсии этих данных методами линейной лучевой томографии Манка (ЛЛТМ) приведены на правом рисунке с учетом слоя донных осадков (нижний рисунок) и без него (верхний). Видно, что учет осадочного слоя в этом случае мелкого моря заметно улучшает результат инверсии, прежде всего, для вариаций профиля скорости звука. Для оценки согласованных с экспериментом значений параметров этого слоя (плотность и скорость звука) были рассчитаны показанные на следующем рисунке корреляционные функции экспериментального шумового поля в частотных интервалах 20 Гц. Линиями разного типа на этом рисунке показаны частотные зависимости времен распространения первых

4-х звуковых мод (дистанция, деленная на групповую скорость моды) для различных параметров слоя осадков. По наилучшему соответствию этих зависимостей и выбирались используемые для расчета параметры, которые оказались близкими к модели такого слоя, полученной учеными США (Zang X., Brown M.G., Godin O.A.). Более точное (чем в рамках ЛЛТМ) восстановление профилей скорости звука и течений в мелком море требует, по-видимому, развития волновых (модовых) подходов к решению обратной задачи. Работа в этом направлении и продолжается в настоящее время (рис. 9).

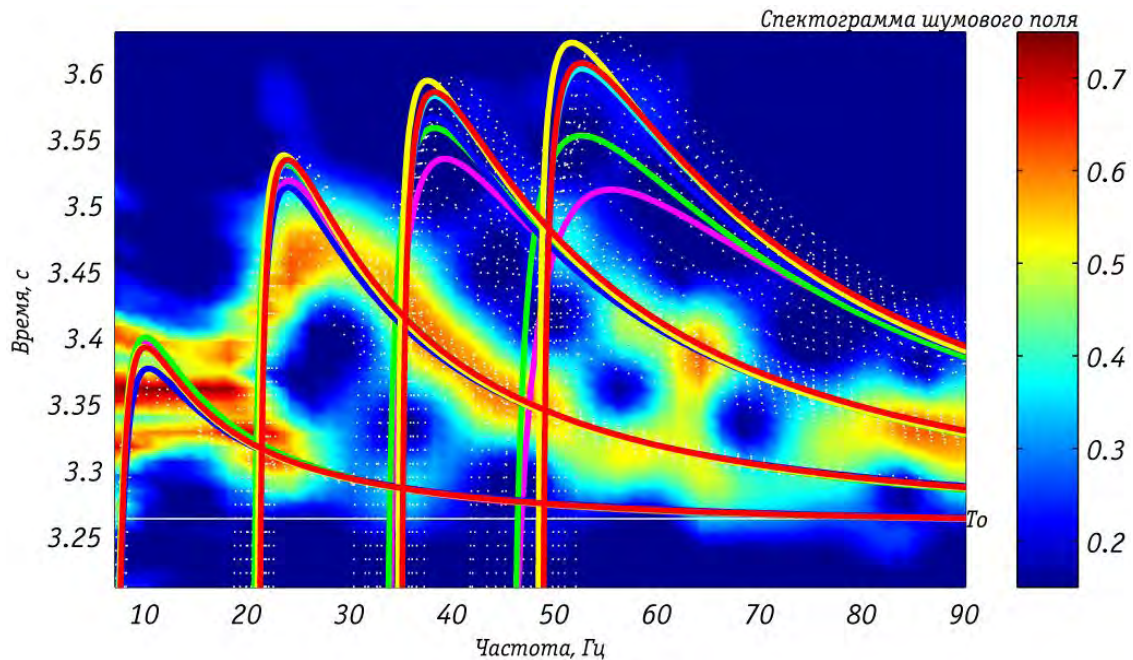


Рис. 9. Корреляция шумового поля на интервалах 20 Гц и расчетные частотные зависимости групповых скоростей первых четырех звуковых мод для различных моделей слоя осадков.

В конце 1990-ых годов в лаборатории ШИФ ИО РАН обратились к экологическим проблемам. В частности, проводились исследования воздействия акустического шума (буровые установки, транспортировка нефти, сейсморазведка и т. п.) на особо охраняемую (по классификации МСОП – исчезающую) популяцию Западных серых китов, имеющую постоянные места летнего нагула на северо-восточной части шельфа о. Сахалин в непосредственной близости от нефтегазовых платформ в море. Л.М. также считал эти работы важными и необходимыми. В качестве примера на левом рисунке показаны результаты волновых (параболическое приближение) расчетов потерь интенсивности низкочастотного шума, распространяющегося от источника (буровая платформа) к берегу, при уменьшении глубины водного слоя от 50 м до 10 м. Неопределенность (отсутствие данных) в выборе значений коэффициента затухания звука в осадочном слое дна привела к необходимости использования рекомендованных в литературе для верхнего слоя неконсолидированных осадков значений от 0.01 до 0.3 дб/(км×Гц) (рис. 10). На правом рисунке приведены зависимости ослабления звука с дистанцией для трех значений коэффициента затухания из этого диапазона. На основе разработанных в лаборатории ШИФ ИО РАН автономных акустических буев были продолжены эксперименты по классической акустической томографии в локальных областях мелкого моря (Геленджик, 2009 и последующие годы). Так, в октябре 2010 г. были записаны непрерывные суточные данные по приему и передаче акустических сигналов с использованием точной синхронизации с помощью спутниковых GPS-систем от трех буев, установленных в вершинах треугольной области на расстоянии порядка 1 км друг от друга. В результате корреляционной обработки



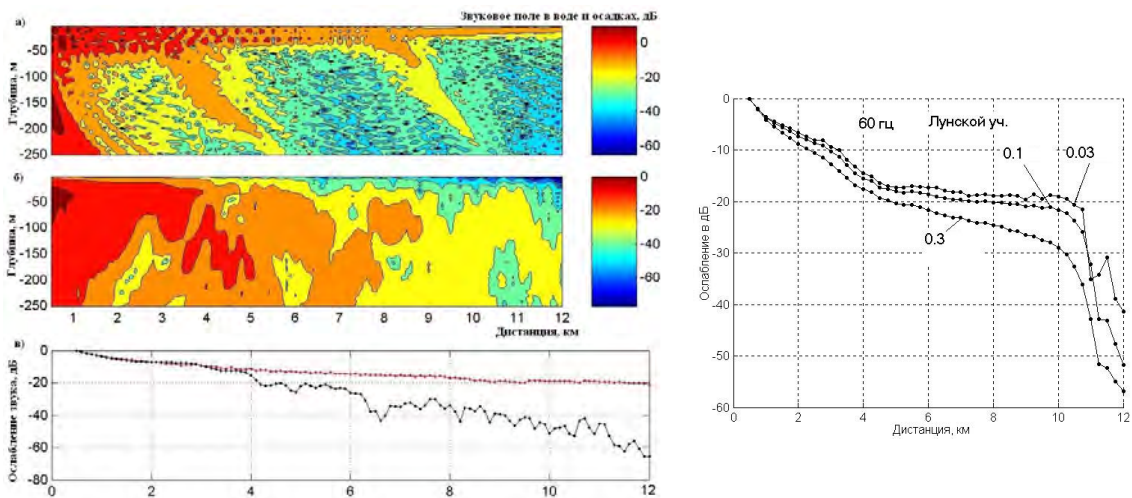


Рис. 10. Распределение интенсивности звукового поля по глубине водного (выше 50–10 м) и донных слоев на частотах 20 Гц (а) и 100 Гц (б). На рис. в) приведено ослабление уровня звука на частотах 20 Гц (черная кривая) и 100 Гц (красная кривая). Потери интенсивности низкочастотного звука частоты 60 Гц, рассчитанные при различных значениях коэффициента затухания звука в донных осадках: (0.03, 0.1, 0.3) дБ/(км×Гц). Отвечающие им линии отмечены на рисунке цифрами.

результатов экспериментов получены зависимости времен пробега сигналов между разнесенными станциями, являющихся основой для реконструкции свойств среды, что позволило, в частности, проследить изменение вектора средней скорости течения в этой области и сравнить с независимыми данными ADCP (см. левый рисунок). Разработанный метод акустической томографии является хорошим дополнением к широко используемому методу измерения течений с помощью доплеровского измерителя ADCP, который может давать ошибочные результаты в случае отсутствия объемных рассеивателей в толще воды (рис. 11).

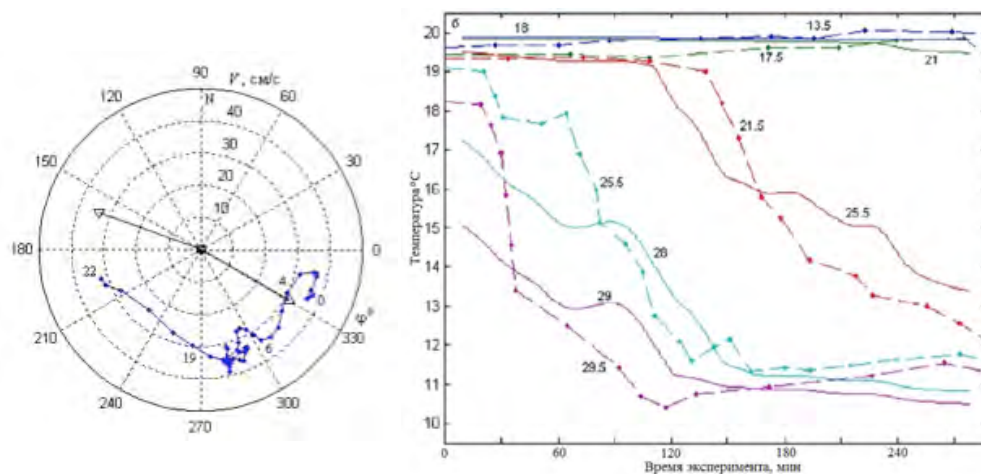


Рис. 11. Сравнение изменения векторов средних скоростей течения, восстановленных методом акустической томографии за 22 часа (точки, каждые полчаса) и двух измерений с помощью ADCP в 5-й (330°) и 25-й (160°) часы (стрелки). Изменение температуры в ходе эксперимента на различных глубинах (цифры в м). Сплошные линии - восстановленное, штриховые - измеренное заякоренной цепочкой термисторов.

Экспериментально полученные вариации времен прихода отдельных звуковых импульсов в этом эксперименте связаны с возможным прохождением внутренних волн (ВВ), смещающих водные слои (профили скорости звука, температуры и др.) в вертикальном направлении. На правом рисунке сплошными линиями показаны соответствующие регулярному восстановленному изменению амплитуды 1-й моды ВВ вариации температуры среды на разных глубинах, указанных цифрами в м. Штриховыми линиями с точками на тех же глубинах показан регулярный ход температуры, измеренный заякоренной цепочкой термисторов в более мелком районе на удалении около 1 км от места проведения акустического эксперимента.

В настоящей статье перечислены только те работы Отдела акустики океана ИО РАН, которые либо проводились под руководством Л.М. Бреховских, либо были им инициированы и которые он считал наиболее важными и перспективными в тематике акустических лабораторий. Часть из этих работ, например, по пассивной акустической томографии в мелком море, разработке перспективных технических средств акустического зондирования среды с целью реконструкции океанологических параметров, продолжается и в настоящее время. Идеи выдающегося ученого, основателя Акустического отдела ИО РАН Л.М. Бреховских продолжают жить и реализуются в современных работах акустических лабораторий Института океанологии.

**ACADEMICIAN L.M. BREKHOVSKIKH IN THE OCEAN ACOUSTICS  
DEPARTMENT OF THE IO RAS**

**V.V. Goncharov, A.I. Vedenev, T.I. Tsyplakova**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117218, Russia, e-mail: [gvv@ocean.ru](mailto:gvv@ocean.ru)  
Submitted 10.12.2017, accepted 25.12.2017*

The article is devoted to the memories of the life of L.M. Brekhovskikh, when he headed the Ocean Acoustics Department at the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences and to studies that were initiated by him or were carried out under his leadership.

The friendly and attentive attitude of L.M. to its employees and disciples, the organization of constant communication of scientists of different generations (in the format of the school-seminar “Acoustics of the Ocean”) is noted, which was the key to the fruitful scientific work of the team. Some significant results of acoustic experiments in the ocean on the scientific research vessels of the Academy of Sciences are presented: the discovery of slightly diverging beam beams (1989–1990); experiments on both acoustic tomography of the ocean bottom (passive tomography 1980) and the water column (1989–1994); data processing of the international experiment (1998–1999) ACOUS.

L.M. was one of the first who realized that acoustic methods are important in understanding and quantifying the physical processes in the ocean and ecology – as means for studies of the effects of industrial noise on marine biota. Part of the research initiated by L.M. Brekhovskikh continue in the Acoustic laboratories of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences and at the present time. Namely,

Гончаров и др.

- studies of the effects of industrial acoustic noise on marine mammals off the coast of Sakhalin island;
- passive tomography of the ocean based on the ocean ambient noise and noise from remote shipping by using data of the international NPAL experiment in the Pacific, and the 2012 experiment in the Florida Strait (O.A. Godin, etc.);
- local acoustic tomography in the shallow water (experiments in the Blue Bay, Gelendzhik, 2009 and subsequent years).

**Keywords:** L.M. Brekhovskikh, passive acoustic tomography, international experiments NPAL, ACOUS , effects of industrial noise on marine biota

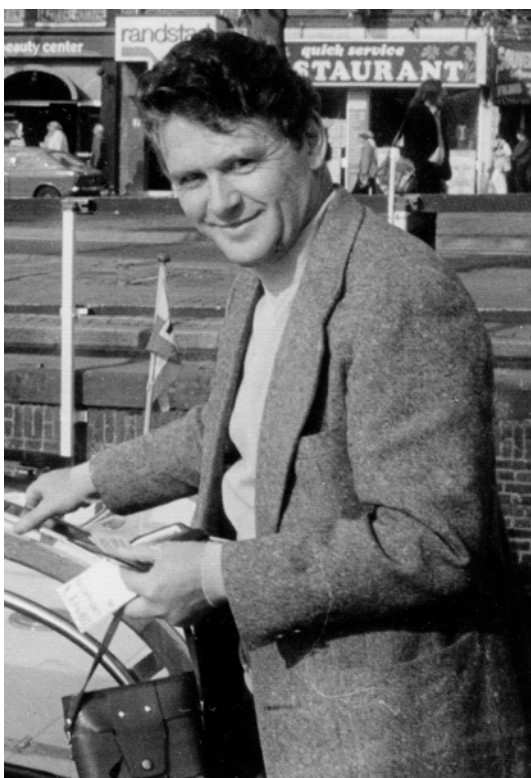
**К 90-ЛЕТИЮ  
КОНСТАНТИНА НИКОЛАЕВИЧА ФЕДОРОВА  
(1927–1988)**

**А.И. Гинзбург<sup>1</sup>, А.Г. Зацепин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [ginzburg@ocean.ru](mailto:ginzburg@ocean.ru), [zatsepin@ocean.ru](mailto:zatsepin@ocean.ru)  
Статья поступила в редакцию 15.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017*

Краткое изложение жизненного пути и основополагающих научных работ (по тонкой термохалинной структуре вод океана, фронтам, изменчивости приповерхностного слоя океана) выдающегося советского физика-океанолога, члена-корреспондента АН СССР К.Н. Федорова, успешно сочетавшего активную научную деятельность на основе комплексного подхода к изучению океана (натурные измерения, лабораторное моделирование, спутниковая информация) с научно-организационной и международным научным сотрудничеством.

**Ключевые слова:** К.Н. Федоров, тонкая термохалинная структура вод океана, океанские фронты, приповерхностный слой океана, СКОР



«Судьба, ты была бесконечно права,  
Меня в моряки выбирая...»

*(Из стихотворения К.Н. Федорова)*

17 декабря 2017 г. исполняется 90 лет со дня рождения выдающегося ученого в области физической океанологии, члена-корреспондента АН СССР, доктора физико-математических наук, профессора Константина Николаевича Федорова (1927–1988).

Константин Николаевич родился в Ленинграде в семье служащих. Отец, Николай Николаевич Федоров, из мещан, окончил реальное училище в Казани и Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ), работал помощником заведующего городской электростанцией в г. Пермь, заведующим учебной частью Рабфака ЛЭТИ, инженером/старшим инженером в Ленэнерго. Мать, Александра Константиновна Федорова-Грот, дворянского происхождения, работала в ряде советских учреждений (Волховстрой, Свирьстрой и др.), позже – референтом академика Г.О. Графтио, заведующей редакцией Издательства АН СССР в Ленинграде, старшим лаборантом-библиографом в Кабинете истории отечественной физиологии Института физиологии им. И.П. Павлова АН СССР. В родословной матери – немало известных имен: филологи академик Я.К. Грот и член-корреспондент К.Я. Грот Императорской Академии наук, философ Н.Я. Грот, почетный член Императорской Академии наук П.П. Семенов-Тянь-Шанский, архитектор К.И. Бланк, поэтесса А.П. Бунина и др.

В годы эвакуации из Ленинграда (1941–1945) окончил 7-й и 8-й классы средней школы в ленинградском интернате села Боровицы Мурашинского района Кировской области, 2 года (1943–1945) проучился в Казанском авиационном техникуме и в июне 1945 г. реэвакуировался в Ленинград, где окончил Ленинградское арктическое училище (1947) с дипломом техника-метеоролога и Высшее Арктическое морское училище им. адмирала С.О. Макарова (1952) как инженер-океанолог. Выбор Макаровского училища в качестве места обучения не был для него однозначным. Обладая несомненными литературными способностями, он собирался поступать на филологический факультет Ленинградского государственного университета. Но в тяжелое послевоенное время остро стоял вопрос, на что жить. В Макаровском училище курсантов обеспечивали всем необходимым, да еще платили немалую по тем временам стипендию. И хотя именно материальный фактор определил выбор будущей профессии, Константин Николаевич никогда не пожалел о принятом решении.

В 1953 г. он поступил в аспирантуру Института океанологии АН СССР (ИО АН) и в 1955 г. под руководством выдающегося океанолога В.Б. Штокмана защитил кандидатскую диссертацию, удостоенную премии Президиума АН СССР. После защиты диссертации участвовал в морских экспедициях Института: в 1956 г. – в черноморской методологической экспедиции Лаборатории динамики моря, в 1957 г. – в 25-м рейсе НИС «Витязь» в Тихий океан по программе Международного Геофизического года, в 1959 г. возглавил научно-исследовательскую экспедицию в Средиземное море на борту судна «Академик С. Вавилов».

В 1958–1959 гг. как выдающийся молодой ученый по стипендии ЮНЕСКО К.Н. Федоров проходил стажировку в Ливерпульском университете и Лондонском королевском колледже, в 1960 г. был участником организованной ЮНЕСКО Межправительственной конференции по океаническим исследованиям в Копенгагене, в 1963–1969 гг. работал в Париже в Службе Океанографии ЮНЕСКО (с 1963 г. – директор этой Службы и Секретарь Межправительственной океаногра-



фической комиссии). Как секретарь МОК он курировал организацию и проведение серии исследований различных регионов Мирового океана – Международной Индоокеанской экспедиции (1959–1965), Международных исследований Атлантики (1963–1964), изучения Курошио и прилегающих районов (1967–1976), активно участвовал в организации 2-го Международного океанографического конгресса в Москве (1966). В 1965 г., в свой отпуск, К.Н. Федоров принял участие в возглавляемом выдающимся американским океанологом Г. Стоммелом рейсе Вудсхолского океанографического института на НИС «Атлантис-II» в тропическую зону Индийского океана. Его совместная с Г. Стоммелом работа по тонкой термохалинной структуре вод океана (1967), основанная на анализе измерений одним из STD-зондов, еще только входивших в практику морских измерений, дала новое направление физической океанологии. После возвращения в Институт океанологии АН СССР он развил это направление на основе анализа данных измерений отечественными STD-зондом АИСТ и акустическим зондом скорости течений «Кроссбим» в рейсах на НИС «Академик Курчатов» (1970) и «Дмитрий Менделеев» (1972). Результатом этой работы явилась докторская диссертация Константина Николаевича (1973), первая в мире монография по данному вопросу «Тонкая термохалинная структура вод океана» (1976) и зарегистрированное открытие № 240 «Явление тонкослойного движения вод открытого океана» (1980, в соавторстве с В.П. Шевцовым и А.С. Мониным).

В 1974 г., после защиты докторской диссертации, К.Н. Федоров возглавил созданную им Лабораторию экспериментальной физики океана (первоначальное название – Лаборатория мезомасштабной гидрофизики), а в 1979 г. организовал Отдел экспериментальной и космической океанологии.

Проблема тонкой структуры вод океана привела К.Н. Федорова к изучению океанских фронтов, где тонкая структура выражена особенно ярко. В своей монографии «Физическая природа и структура океанических фронтов» (1983) он сформулировал концепции всемасштабности фронтальных явлений в океане, многофронтальности климатических фронтальных зон, указал на важную роль фронтов как элементов динамики вод океана, областей активного перемешивания вод и вихреобразования, а также дал общепринятые теперь определения и классификацию фронтов и фронтальных зон. В 1986 г. он становится руководителем и координатором проекта «Фронт» как части общегосударственной программы исследования Мирового океана.

Цикл очень важных и во многом основополагающих работ К.Н. Федорова связан с исследованием структуры и изменчивости приповерхностного слоя океана, быстро реагирующего на кратковременные и локальные воздействия атмосферы и солнечной энергии, нижняя граница которого в большинстве случаев связана с положением суточного термоклина. Для исследования тонкого пограничного (термического и солевого) слоя у поверхности раздела океан–атмосфера, который трудно изучать в натуральных условиях, Константином Николаевичем был развернут лабораторный эксперимент (1976). В дальнейшем созданная им группа эксперимента-

торов поставила ряд интересных лабораторных экспериментов по моделированию конвекции, турбулентного перемешивания, интрузионных процессов в океане, неустойчивости бароклинных вихрей, динамике вихревых диполей и внутритермоклинных вихрей и других явлений, характерных для океана.

К.Н. Федоров был одним из первых океанологов, кто начал использовать спутниковые данные для получения новых знаний об океане. На основе спутниковой информации им и сотрудниками возглавляемого им Отдела экспериментальной и космической океанологии были получены важные научные результаты по динамике фронтальных зон и выявлению нестационарных упорядоченных структур различной природы. Им (в соавторстве с А.И. Гинзбург) обнаружена не известная ранее и широко распространенная в океане форма нестационарных вихревых движений в океане – грибовидные течения, или вихревые диполи (1983), выявлены характерные для многих фронтальных зон прибрежного апвеллинга нестационарные струи и вихри (1984). Результаты исследований многообразия физических процессов в приповерхностном слое и особенностей его динамики на основе измерений в океане, лабораторного моделирования и спутниковых данных изложены в последней монографии К.Н. Федорова (в соавторстве с А.И. Гинзбург) «Приповерхностный



Сотрудники Отдела экспериментальной и космической океанологии, который возглавлял К.Н. Федоров (ИО АН, 1982). Слева направо: верхний ряд – Михаил Фролов, Сергей Дикарев, Александр Казьмин, Владислав Власов, Александр Грабовский, Андрей Костяной; средний ряд – Владимир Лобыцын, Владимир Скляр, Константин Николаевич Федоров, Сергей Владимирович Переслегин, Павел Алексеевич Деревщиков, Анатолий Супренков, Юрий Сутырин, Александр Островский, Андрей Зацепин, Дмитрий Гордейчев, Владимир Соломаха; нижний ряд – Елена Андрулионис, Елена Бобкова, Наталия Кузьмина, Анна Гинзбург, Людмила Копрова, Леонид Питербарг.



К.Н. Федоров и А.Г. Зацепин проводят лабораторный эксперимент (ИО АН, 1983).



Слева направо: верхний ряд – Г.И. Баренблатт, К.Н. Федоров, В. Манк, А.М. Павлов, Т.О. Абрамян, А.Г. Костяной, А.Г. Зацепин, И.А. Филиппов; нижний ряд – С.И. Воропаев, Дж. Манк, А.И. Гинзбург (ИО АН, 1987).



слой океана» (1988). Все три монографии К.Н. Федорова переведены на английский язык и изданы за рубежом.

Широкий спектр направлений, которые одновременно вел Константин Николаевич, его комплексный подход к изучению океана (от лабораторного моделирования до интерпретации спутниковых изображений) и океанологическая эрудиция позволяли ему знать океан во всем многообразии протекающих в нем процессов. Девизом созданной им научной школы могли бы быть часто повторяемые им слова американского океанолога Р. Ревелла: «Задавайте вопросы океану». Под руководством К.Н. Федорова было защищено 12 кандидатских диссертаций. До сих пор его ученики продолжают успешно работать в различных направлениях физической океанологии.

Особенностями Константина Николаевича как научного руководителя были ненавязчивость в выборе темы исследования и поощрение творческих устремлений молодых сотрудников. Конечно, он последовательно передавал им свои знания и представления о предмете исследования, устраивая тематические лекции, проводя еженедельные лабораторные семинары. Но, прежде всего, он стремился увлечь их наукой об океане и теми ее направлениями, которыми сам занимался. Он хорошо понимал, что увлеченный делом специалист достигает больших успехов в науке, по сравнению с «исполнительным ремесленником». И при этом испытывает радость творческой жизни. Эта радость была неотъемлемым атрибутом его собственного существования.

Большой удачей было участие в морских экспедициях под его началом. В этих рейсах, наряду с выполнением ранее запланированных задач, всегда находилось



34-й рейс НИС «Академик Курчатов», Гавайи, 1982 г. Слева направо: А.Г. Зацепин, А.С. Казьмин, К.Н. Федоров, В.Л. Власов.



К.Н. Федоров и Л.М. Бреховских  
(СКОР, Бретань, 1984 г.).

время для внеплановых исследований. Он считал, что океанолог не должен проходить мимо интересных и ярких явлений при встрече с ними в море, ведь такая встреча может не повториться. Так, в 1978 г., в руководимом им 27-м рейсе НИС «Академик Курчатов» по программе «ПОЛИМОДЕ», экспедиция на несколько дней отвлеклась от выполнения базового задания для изучения воздействия тропического урагана «Элла», прошедшего через акваторию судовых работ в Саргассовом море. Были выполнены несколько СТД-разрезов через «свежий» след урагана и повторные разрезы по прошествии нескольких недель. Работы, опубликованные по результатам исследования следа «Эллы», обогатили представления о глубине проникновения воздействия урагана в стратифицированную морскую среду и о продолжительности этого воздействия.

К.Н. Федоров был одним из немногих ученых, которым удавалось успешно сочетать интенсивную научную работу с научно-организационной, в том числе с международным научным сотрудничеством, а также с преподаванием. Его карьера в этих областях складывалась следующим образом. Президент (1976–1980) и Почетный Президент (1980–1988) Научного комитета по исследованию океана (СКОР'а), председатель рабочих групп СКОР'а № 36 (процессы в прибрежном апвеллинге, 1973–1975) и № 69 (мелкомасштабная турбулентность и перемешивание в океане, 1980–1988). Член Межведомственной комиссии по международному морскому праву, член Комиссии АН СССР по использованию природных ресурсов из космоса (1975–1988), член рабочей группы по дистанционному зондированию (РГДЗ) совета «Интеркосмос» (1980–1988).



Член редколлегии журналов «Исследование Земли из космоса» (1980–1988), Deep-Sea Research (Великобритания, 1982–1983), Limnologia o Oceanografia (Италия, 1982–1988), Атласа океанов (1983–1988), секции «Океанология» Редсовета издательства «Гидрометеиздат» (1985–1988). Читал курсы лекций студентам 5 курса кафедры океанологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова по тонкой термохалинной структуре вод океана (1978–1979) и основам дистанционного зондирования океана из космоса (1985–1987), консультировал экипажи советских орбитальных космических станций по исследованию океана.

В 1987 г. он был избран членом-корреспондентом АН СССР и стал заместителем директора Института по физическому направлению. Выросли его возможности влиять на развитие физической океанологии в нашей стране, укреплять и расширять международное сотрудничество океанологов. Однако внезапная смерть в сентябре 1988 года не дала их вполне реализовать, как и многие его творческие начинания и планы...

Константин Николаевич был разносторонне одаренным человеком. Он мастерски владел словом, его яркие доклады в нашей стране и за рубежом надолго запоминались, им написано немало научно-популярных статей. В свободное от науки время он писал стихи и переводил зарубежных поэтов, хорошо рисовал, резал по дереву, великолепно готовил. Некоторые из его рисунков, выполненные в ходе океанских экспедиций, вошли в экспозицию документально-художественной выставки «Музы в храме науки», организованной Архивом РАН (февраль–март 2008 г., Москва).

На 9-й сессии подкомитета по географическим названиям Международной Генеральной Батиметрической Карты Океанов (1992) было принято предложение ИО АН СССР назвать одну из гор западной части Тихого океана ( $14^{\circ}07.3'N$ ,  $156^{\circ}11.0'E$ ), обнаруженную в рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 1984 г., «Гайот Федорова». Название утверждено в июне 2004 г. в Санкт-Петербурге на XVII заседании комиссии МОКМГО/SCUFNXVII (ЮНЕСКО). В 1998 г. в память о К.Н. Федорове в Санкт-Петербурге был проведен Международный симпозиум «OCEANIC FRONTS AND RELATED PHENOMENA» с участием ученых из более 20 стран.

### Основные научные труды К.Н. Федорова

- Федоров К.Н.* Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 184 с. (переведена на английский, издана в 1978, Pergamon Press).
- Федоров К.Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с. (переведена на английский, издана в 1986, Springer-Verlag).
- Федоров К.Н., Гинзбург А.И.* Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с. (переведена на английский и издана в 1992, VSP, The Netherlands).
- Stommel H., Fedorov K.N.* Small-scale structure in temperature and salinity near Timor and Mindanao // Tellus. 1967. No 2. P. 306–325.

**TO THE 90th ANNIVERSARY OF  
KONSTANTIN NIKOLAEVICH FEDOROV  
(1927–1988)**

**A.I. Ginzburg<sup>1</sup>, A.G. Zatsepin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36,  
Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia,  
e-mail: [ginzburg@ocean.ru](mailto:ginzburg@ocean.ru), [zatsepin@ocean.ru](mailto:zatsepin@ocean.ru)  
Submitted 15.12.2017, accepted 25.12.2017*

A brief account of the life path and basic scientific works (on the thermohaline finestructure of the ocean, on fronts, on the variability of the near-surface layer of the ocean) by the outstanding Soviet physicist-oceanologist, corresponding member of the USSR Academy of Sciences K.N. Fedorov, successfully combining scientific activity on the basis of an integrated approach to ocean research (field measurements, laboratory modeling, satellite information) with scientific and organizational and international scientific cooperation.

**Key words:** K.N. Fedorov, thermohaline finestructure of the ocean, oceanic fronts, variability of the near-surface layer of the ocean, SCOR

**References (The main scientific works of K.N. Fedorov)**

- Fedorov K.N.*, Tonkaja termohalinnaja struktura vod okeana. L.: Gidrometeoizdat, 1976, 184 p. (The Thermohaline Finestructure of the Ocean. Pergamon Press, 1978, 170 p.)
- Fedorov K.N.*, Fizicheskaja priroda i struktura okeanicheskikh frontov. L.: Gidrometeoizdat, 1983, 296 p. (The Physical Nature and Structure of Oceanic Fronts. Springer-Verlag, 1986, 333 p.)
- Fedorov K.N.*, *Ginsburg A.I.*, Pripoverhnostnyj sloj okeana. L.: Gidrometeoizdat, 1988, 259 p. (The Near-Surface Layer of the Ocean. Utrecht, The Netherlands: VSP, 1992, 259 p.)
- Stommel H.*, *Fedorov K.N.*, Small-scale structure in temperature and salinity near Timor and Mindanao, *Tellus*, 1967, No. 2, pp. 306–325.

## К 90-ЛЕТИЮ ГРИГОРИЯ ИСААКОВИЧА БАРЕНБЛАТТА

А.Г. Зацепин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36 e-mail: [zatsepin@ocean.ru](mailto:zatsepin@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 15.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Г.И. Баренблатт – выдающийся советский и российский механик и математик, чьи научные работы в области проблем механики сплошной среды хорошо известны международному научному сообществу и отмечены многими международными почетными наградами и премиями. В области океанологии им выполнен ряд исследований динамики турбулентности стратифицированной жидкости (модели переноса тяжелых частиц турбулентным потоком, динамики турбулентного пятна на вязкой стадии растекания в линейно-стратифицированной жидкости и др.).

**Ключевые слова:** Г.И. Баренблатт, проблемы механики сплошной среды, гидродинамика, турбулентность, автомодельность



10 июля 2017 года исполнилось 90 лет выдающемуся механику и математику, главному научному сотруднику Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), доктору физико-математических наук, профессору Григорию Исааковичу Баренблатту.

Г.И. Баренблатт – специалист в широкой области проблем механики сплошной среды (механика деформируемых твердых тел, механика их разрушения, турбулентность нелинейные волны, теория фильтрации жидкости и газа, автомодельность и промежуточные асимптотики). Ему принадлежат многочисленные и часто цитируемые публикации в отечественных и зарубежных научных журналах, а также ряд монографий (см. ниже), в том числе «Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика: теория и приложения к геофизической гидродинамике» (1978, 2-е изд. 1982.; англ. изд. 1979 и 1996).

Григорий Исаакович родился в семье врачей. Его мать – вирусолог Надежда Вениаминовна Каган, разрабатывая вакцину против вирусного энцефалита, трагически погибла, заразившись этой опасной болезнью. Отец – известный московский врач-эндокринолог Исаак Григорьевич Баренблатт, соавтор многократно переиздававшегося «Терапевтического справочника» в 2-х томах (1937–1946). С математикой Григория Исааковича еще в детстве связал его дед по материнской линии, доктор физико-математических наук, профессор и зав. кафедрой мехмата МГУ, лауреат Сталинской премии Вениамин Федорович Каган, в семье которого он воспитывался с одиннадцатилетнего возраста.

После окончания в 1950 году механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Г.И. Баренблатт, под руководством своего учителя академика А.Н. Колмогорова, защитил кандидатскую (1953), а затем и докторскую (1957) диссертации. Григорий Исаакович работал в Институте нефти Академии наук СССР (1953–1961), был заведующим отделом пластичности Института механики МГУ (1961–1975). В эти же годы он принял активное участие в создании Института проблем механики Академии наук СССР (1965) и был заместителем директора этого института (на общественных началах).

В Институт океанологии Григорий Исаакович был приглашен в 1975 году тогдашним директором Института членом-корреспондентом АН СССР А.С. Мониным для создания и руководства Теоретическим отделом Института, что было им успешно осуществлено.

Работая в Институте в 1970-ых – начале 1990-ых годов, Григорий Исаакович выполнил ряд оригинальных исследований динамики турбулентности в стратифицированной жидкости. В том числе, он разработал модель переноса тяжелых частиц турбулентным потоком, модель динамики турбулентного пятна на вязкой стадии растекания в линейно-стратифицированной жидкости, модели ступенчатого расслоения турбулентной стратифицированной среды, придонных высокоэнергетических слоев и вихревых диполей (федоровских структур) в океане.

Будучи за рубежом в 1990–2000-х годах, Г.И. Баренблатт совместно с А.Дж. Чориным и В.М. Простокишиным показали, что универсальный логарифмический закон сопротивления Кармана-Прандтля турбулентного пограничного слоя ошибочен: он основан на неверном предположении и противоречит экспериментальным данным. Был установлен новый, степенной закон сопротивления, который прошел проверку на сотнях экспериментах на потоках в трубах и пограничных слоях, и было получено показательное совпадение.

После возвращения в Россию в 2012 г. Г.И. Баренблатт продолжил активно заниматься научными исследованиями. Среди полученных им недавних результатов следует отметить опубликованный в 2015 г. в работе «Феномен Колмогорова-Обухова в учении о турбулентности» анализ, показывающий, что знаменитый закон « $2/3$ » с определенной точностью подтверждается экспериментом, однако константа в этом законе не является универсальной, а зависит от числа Рейнольдса, так что автомодельность по числу Рейнольдса – неполная.

В соавторстве с Г.С. Голицыным, Н.Н. Ереминым и В.С. Урусовым Григорием Исааковичем было установлено существование универсального линейного наномасштаба – масштаба кристаллической решетки. Предложено его выражение в виде степенной функции постоянной Планка, плотности материала и модуля Юнга. Показано, что этот масштаб близок к одному ангстрему для всех кристаллических структур. Он является пороговым масштабом, начиная с которого становятся существенными квантовые эффекты.

Другая недавняя работа Г.И. Баренблатта, выполненная совместно с Л.И. Лобковским и Р.И. Нигматулиным (2017), посвящена математическому моделированию процесса истечения газа из газонасыщенного льда и газогидратов. В этой работе впервые предложен физический механизм деградации природных агломератов, включающих лед, газогидраты и микропоры с газом. Этот механизм эффективно работает благодаря образованию связанной системы микроканалов и микротрещин, заполненных газом, в результате действия значительного градиента давления на границах включений агломератов в минеральную породу-матрицу. Эволюция возникающего погранслоя на границе матрицы и включения, в котором происходит движение газа, описывается автомодельным решением. При этом сам процесс истечения и заполнения газом микроканалов включения наблюдался в лабораторных экспериментах.

Научные результаты Григория Исааковича высоко оценены международным сообществом. Он является членом Российского национального комитета по теоретической и прикладной механике (1961), иностранным членом трех основных национальных Академий наук США (1997), иностранным членом Лондонского Королевского общества (2000), а также членом многих других учёных обществ, первым Тейлоровским профессором гидромеханики Кембриджского университета (1992–1994), работал приглашенным профессором ряда университетов США, Великобритании, Испании, Италии и Франции.

Его научная деятельность отмечена многими почетными наградами и премиями, среди них: медаль и премия Модесто Паннети (1995 г., Италия), медаль Лагранжа Национальной академии деи Линчеи (1995 г., Италия); медаль Джеффри Тейлора общества инженерных наук (1999 г., США); медаль и премия Джеймса Максвелла международного конгресса промышленной и прикладной математики (1999 г.); медаль А.М. Обухова (2013 г.).

В свой славный юбилей Григорий Исаакович сохраняет бодрость духа и юношеское стремление к научному поиску. Руководство ИО РАН, его коллеги и ученики сердечно поздравляют его с Юбилеем и желают здоровья, долгих лет жизни и плодотворного творчества!



**Монографии Г.И. Баренблатта, содержащие основные научные результаты**

- Баренблатт Г.И.* Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика: теория и приложения к геофизической гидродинамике. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 255 с.
- Баренблатт Г.И., Ентов В.Н., Рыжик В.М.* Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
- Баренблатт Г.И.* Автомодельные явления – анализ размерностей и скейлинг. М. ID Intellect, 2009. 216 p.
- Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.* Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 С.
- Лисицын А.П., Баренблатт Г.И.* Гидродинамика и осадкообразование. М.: Наука. 1983. 232 с.
- Barenblatt G.I.* Dimensional analysis. New York, 1987. 135 p.
- Barenblatt G.I.* Scaling phenomena in fluid mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, 1994. 50 p.
- Barenblatt G.I.* Scaling. Cambridge University Press, Cambridge, 2003. xvi, 171 p.
- Barenblatt G.I.* Deformation and Fracture. Cambridge University Press, Cambridge, 2014. 255 p.

**TO THE 90th ANNIVERSARY OF  
GRIGORY ISAAKOVICH BARENBLATT**

**A.G. Zatsepin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [zatsepin@ocean.ru](mailto:zatsepin@ocean.ru), Submitted 15.12.2017, accepted 25.12.2017*

G.I. Barenblatt is an outstanding Soviet and Russian mechanic and mathematician whose scientific works in the field of problems of continuum mechanics are well known to the international scientific community and are marked by many international honorary awards and prizes. In the field of oceanology, he carried out a series of studies on the dynamics of the turbulence of a stratified fluid (models of heavy particle transport by a turbulent flow, turbulent spot dynamics at a viscous spreading stage in a linearly stratified fluid, etc.).

**Keywords:** G.I. Barenblatt, problems of continuum mechanics, hydrodynamics, turbulence, self-similarity

**Monographs of G.I. Barenblatt, containing the main scientific results**

- Barenblatt G.I.*, Avtomodel'nye javlenija – analiz razmernostej i skejling, M. ID Intellect, 2009, 216 p.
- Barenblatt G.I.*, Deformation and Fracture, Cambridge University Press, Cambridge, 2014, 255 p.
- Barenblatt G.I.*, Dimensional analysis, New York, 1987, 35 p.
- Barenblatt G.I.*, Podobie, avtomodel'nost', promezhutochnaja asimptotika: teorija i prilozhenija k geofizicheskoj gidrodinamike, Leningrad, Hydrometeoizdat, 1982, 255 p.
- Barenblatt G.I.*, Scaling phenomena in fluid mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1994, 50 p.
- Barenblatt G.I.*, Scaling, Cambridge University Press, Cambridge, 2003, xvi+, 171 p.
- Barenblatt G.I., Entov V.N., Ryzhik V.M.*, Dvizhenie zhidkostej i gazov v prirodnyh plastah, Moskva: Nedra, 1984, 211 p.
- Lisicyn A.P., Barenblatt G.I.*, Gidrodinamika i osadkoobrazovanie, Moskva: Nauka, 1983, 232 p.
- Zel'dovich Ja.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Maxviladze G.M.*, Matematicheskaja teorija gorjenja i vzryva, Moskva: Nauka, 1980, 478 p.

## К 100-ЛЕТИЮ ВАЛЬТЕРА МАНКА (WALTER MUNK)

Е.Г. Морозов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [egmorozov@mail.ru](mailto:egmorozov@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 05.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Вальтер Манк (Walter Munk) – один из наиболее известных океанологов нашего времени – недавно отпраздновал свое 100-летие. Он родился в Австрии 19 октября 1917 г. В возрасте 14 лет семья переехала в Нью-Йорк. Его родители готовили сыну карьеру банкира, чтобы продолжать семейный бизнес. Через некоторое время семья переехала в Калифорнию.



В. Манк и его научный руководитель Х. Свердруп в конце 1930-х годов.

Однако финансовая деятельность ему была не по душе, и он начал посещать лекции в California Institute of Technology, где и защитил диплом по геофизике в 1940 г. В 1939 г. он получил американское гражданство.

В это время он попросился на летнюю работу в океанографический институт Скриппса в Ла Хойе (Scripps Institution of Oceanography). На следующий год директор института, известный норвежский океанограф Харальд Свердруп (Harald Sverdrup) принял его как аспиранта, однако сказал, что «он не видит ни одной должности в океанографии, которая бы могла появиться в следующем десятилетии».

Он очень недолго служил в армии, но потом был освобожден от службы, чтобы перейти на работу по оборонной тематике в Скриппсе. В 1947 г., после выполнения многих важных работ по военной тематике, он получил степень доктора (Ph.D. in oceanography) в Университете Калифорнии.

Сейчас Walter H. Munk занимает должность Professor emeritus of geophysics at the Scripps Institution of Oceanography at the University of California San Diego. Он, пожалуй, самый признанный и известный океанограф из ныне живущих и один из основателей современной физической океанографии. Газета New York Times к его 100-летию назвала его Эйнштейном в океанографии.

Его оригинальные исследования в океанографии и геофизике продвинули науку вперед, и океанографы стали лучше понимать океанские волны, круговороты течений, приливы, внутренние волны, акустику океана и овладели новыми методами обработки данных, которые предложил Манк.

Его научная карьера отражает историю океанографии за последние 80 лет. Он получил множество наград и медалей как международных, так и американских.

В 1999 г. Манку присудили премию Киото за его вклад в океанографию (Kyoto Prize in Basic Sciences for his fundamental contributions to the field of oceanography) – такую награду впервые дали океанографу. В 2001 году он стал первым победителем медали Принца Монако Альберта I, которую учредили принц Монако Ранье III и Международная ассоциация физических наук об океане (IAPSO). Решение принимала специальная комиссия IAPSO, в которой я был одним из членов.

Во время войны Вальтер Манк (в 1942 г. ему было 25 лет) совместно со Свердрупом предложил расчет волн наката, что облегчило высадку десанта в северной Африке, а потом и в Нормандии. Прогноз дал возможность высадки десанта в короткий период относительного затишья. Это дало союзникам тактическое преимущество во время Второй мировой войны.

Он сам впоследствии рассказал об этом уже в 2009 г. Погодные условия были плохие, и командующий высадкой союзных войск в Нормандии в 1944 г. Д. Эйзенхауэр отложил высадку в ожидании улучшения погоды. Но затем отменил это решение, поскольку после долгого ожидания был риск упустить фактор неожиданности десанта с моря.



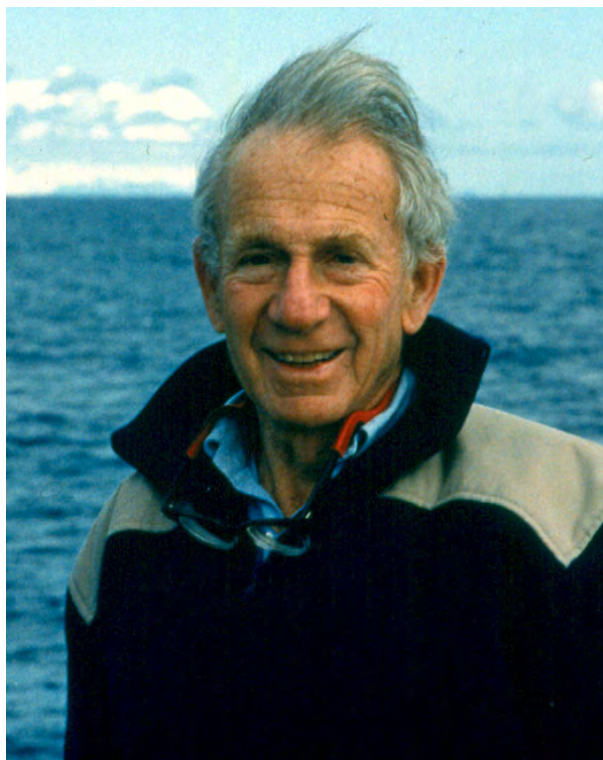
В. Манк, А.Г. Колесников и С.С. Войт на палубе НИС «Михаил Ломоносов», 1959 г.

Манк участвовал в испытаниях атомной бомбы на атолле Бикини в 1946 г., а затем в 1952 г. и водородной бомбы. Он исследовал, как быстро радиоактивные вещества распространяются в лагуне и возникает ли волна цунами при взрыве. Во время испытаний он получил дозу излучения и попал под радиоактивный дождь. Ему и его коллегам пришлось сбросить и утопить одежду.

В 1956 г. он занялся изучением колебаний и волн в океане, которое затем переросло в исследование длинных волн и цунами. В сотрудничестве с Джоном Тюки (John Tukey) они предложили расчеты спектров для исследования волн. Исследование включило в себя эксперимент в 1963 г. по распространению волн, генерированных сильными штормами в Южном полушарии, которые преодолевали тысячи километров в Тихом океане. Они установили станции наблюдений от Новой Зеландии до Аляски.

В 1957 г. он предложил бурить скважину в океане, где толщина плиты меньше, чем на континенте, чтобы досверлить до границы Мохоровичича (проект Mohorovičić Discontinuity). Такой проект было невозможно осуществить на суше, где мантия расположена глубже от поверхности, чем в океане. Бурение началось в 1961 г. около острова Гваделупа вблизи Калифорнии. В результате это исследование дало начало программе глубоководного бурения в океане.

В 1969 г. он начал измерения приливов в глубоком океане с помощью приборов, устанавливаемых на дне, которые затем всплывали по команде на акустические размыкатели. Одним из результатов этих исследований было обнаружение амфидромической точки между Калифорнией и Гавайскими островами.



В. Манк в 1991 г. на острове Херд.



В течение десятилетия он совместно с Д. Картрайтом (D. Cartwright) работал над улучшением предвычислений приливов, что завершилось публикацией статьи в 1966 г. “Tidal spectroscopy and prediction”.

В 1972 г. вместе со своим аспирантом К. Гарреттом (C. Garrett) он предложил фоновую модель внутренних волн. Это была модель универсального спектра энергии внутренних волн как функция вектора волновых чисел и частоты.

В 1979 г. он опубликовал книгу о распространении звука в океане: “Sound Transmission through a Fluctuating Ocean” совместно с R. Dashen, K. Watson и F. Zachariasen.

В 1991 г. начались исследования акустической термометрии в океане и работы по дальнему распространению звука в океане. Манк проводил работы на далеком острове Херд в южной части Индийского океана. Оттуда с судна посылались акустические сигналы, которые, обойдя полсвета, принимались на западном и восточном побережьях США. Работа завершилась в 1995 г. публикацией книги совместно с P. Worcester and C. Wunsch: “Ocean Acoustic Tomography”.

Манк был одним из инициаторов исследования воздействия ветра на циркуляцию в океане.

Он не ограничивался одной лишь океанографией. В 1960 г. он развил идею, высказанную ранее Лордом Кельвином, о том, почему Луна повернута к Земле одной стороной. Это связано с отсутствием у Луны жидкого ядра, а центр массы смещен в сторону Земли.

В это же время Манк занялся неравномерностью вращения Земли, в том числе чандлеровским движением полюса (Chandler wobble) и другими долгопериодными колебаниями, а также изменением длины дня и связи этих явлений с приливами.

Манк получил глобальные оценки перемешивания в океане. Основная энергия для перемешивания поступает от приливов, и это с помощью генерируемых приливом внутренних волн обеспечивает поддержку существующей стратификации в океане. Иначе весь океан был бы заполнен слоем холодной воды, которая только в верхней части прогревалась бы солнечными лучами.



Джудит и Вальтер Манк празднуют 50-летие свадьбы (2003).





Ассамблея IAPSO в Праге в 2015 г. Президенты IAPSO и лауреаты медали Принца Альберта I: Слева направо Т. McDougal, Н. Bryden, D. Smythe-Wright, Т. Yamagata, W. Munk, Е. Morozov, L. Mysak.

В 1953 г. Манк женился на Judith Horton. Она была постоянной спутницей Манка в его поездках, а дома занималась архитектурой и восстановлением старых зданий. Judith Munk умерла в 2006 г. В 2011 г. Манк женился на Mary Coakley. Она была и остается общественным деятелем в Ла Хойе.

Манк несколько раз посещал наш институт. На моей памяти – его доклад на семинаре в начале 1970-х годов в Люблино про влияние Луны на циркуляцию в океане.



В. Манк у себя дома.

В 2015 году я как Президент IAPSO пригласил его сделать доклад на Ассамблее IAPSO в Праге. На удивление, он согласился, приехал и сделал два доклада о внутренних волнах и акустике. Ему тогда было 98 лет.

Желаем Вальтеру Манку еще многих лет жизни и продолжения научных исследований.

## К 40-ЛЕТИЮ ПОА «ПАЙСИС» И 30-ЛЕТИЮ ГОА «МИР»

А.М. Сагалевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [sagalevitch.am@ocean.ru](mailto:sagalevitch.am@ocean.ru)  
Статья поступила в редакцию 15.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017



Руководитель Лаборатории научной эксплуатации глубоководных обитаемых аппаратов, профессор А.М. Сагалевич

В составе флота Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) состояли пять обитаемых подводных аппаратов – аппарат «Аргус» (1975–1994 гг.) для работ на глубине до 600 м, два аппарата «Пайсис» («Pisces» 1977–1991 гг.), способные опускаться на 2 км и два аппарата «Мир» (с 1987 г.) с глубиной погружения до 6 км.

Подводный обитаемый аппарат «Аргус» создан инженерами и конструкторами Опытного-конструкторского бюро океанологической техники Института океанологии РАН. Первый этап строительства ПОА «Аргус» выполнен на судоремонтном заводе Речфлота в Белом Городке. Этап сборки и оснащение аппарата системами и аппаратурой продолжился в Голубой бухте близ Геленджика, где находится Южное отделение ИО РАН. Создатели ПОА «Аргус» – главный конструктор Н. Гребцов, руководитель испытаний В. Бровка, ведущий конструктор Е. Павлюченко, «электрический профессор» и автор книги «Техника пилотирования подводных обитаемых аппаратов» А. Сидоров, автор легкого корпуса И.М. Босак, главный гидравлик В. Фокин.



Подводный обитаемый аппарат «Аргус» в Голубой бухте.

В мае 1975 г. и в марте 1976 г. для Института океанологии Академии Наук СССР были построены два аппарата с глубиной погружения 2000 м – «Пайсис VII» и «Пайсис XI». Аппараты предназначались для изучения физических параметров воды, а также геологии, биологии и химии океана. Значительная часть аппаратуры, например, совмещенная с телевидением, 24-канальная система сбора и регистрации данных, микропроцессорная система навигации по донным маякам–ответчикам с дисплеем отображения реального движения аппарата и прочее оборудование были закуплены дополнительно и смонтированы уже на готовых аппаратах в период их ввода в практику исследований Институтом океанологии. За строительством аппаратов и соблюдением всех требований заказчика наблюдали два ведущих специалиста ИО РАН по подводным исследованиям – профессора И. Михальцев и А. Сагалевич.

После постройки, сдачи и приемки аппараты «Пайсис» сначала были доставлены к Черному морю в Южное отделение Института океанологии Академии Наук, а первые серьезные испытания начались в 1977 г. на озере Байкал. Комплексная геолого-геофизическая Байкальская экспедиция была организована Институтом океанологии, под патронажем А.С. Мониной, начальником экспедиции стал молодой ученый Евгений Гилельевич Мирлин. На полигоне в районе Листвянки и Больших Котов было выполнено 26 научных и 17 технических погружений с целью изучения подводных склонов, проведения геоморфологической и магнитной съемки, измерения теплового потока, подводного фотографирования и проверки работоспособности систем аппаратов.



В 1977–1991 гг. аппараты «Пайсис» участвовали во многих экспедициях Института океанологии в различных районах Мирового океана. Научно-исследовательские суда «Академик Курчатов», «Дмитрий Менделеев» и «Академик Мстислав Келдыш» стали носителями аппаратов.



«Пайсис VII» в Музее Мирового океана (г. Калининград).

Глубоководные обитаемые аппараты (ГОО) «Мир-1» и «Мир-2» были построены в Финляндии на фирме «Rauma-Repola» в 1987 году. Руководителем проекта по созданию аппаратов был профессор И. Михальцева, его заместителем А. Сагалевич, руководителем группы финских инженеров был главный инженер проекта Саули Руохонен. Строительство аппаратов было начато в мае 1985 года и закончено в ноябре 1987 года. В декабре 1987 года были проведены глубоководные испытания аппаратов в Атлантике на глубины 6170 м («Мир-1») и 6120 м («Мир-2»).

Аппараты были установлены на судне обеспечения «Академик Мстислав Келдыш», построенном в 1981 году в Финляндии и переоборудованном в 1987 г. для проведения работ с ГОО «Мир». Только за 1987–2005 гг. было проведено 35 экспедиций в Атлантический, Тихий и Индийский океаны с применением ГОО «Мир-1» и «Мир-2», а также 16 экспедиций с применением ПОО «Пайсис VII» и «Пайсис XI» (1977–1991). Были обследованы большие площади дна океана, сложенные полиметаллическими рудами. «Черные курильщики», выносящие горячую массу из недр океанической коры, окружены гигантскими геологическими постройками, сложенными сульфидами металлов, содержащими высокий процент железа, марганца, никеля, меди, цинка, кобальта и других металлов. В процессе погружений ГОО «Мир» исследован необычный животный мир гидротерм, рождение и жизнь которого связаны с бактериальным хемосинтезом при полном отсут-

ствии солнечного света. Это явление получило название хемобиос в отличие от фотобиоса – процесса зарождения жизни, в котором источником энергии является солнечная радиация.

С помощью аппаратов «Мир» проводились работы на затонувшей атомной подводной лодке «Комсомолец». Осуществлялся многолетний радиационно-океанологический мониторинг в районе гибели лодки и на самом корпусе лодки, был проведен комплекс уникальных подводно-технических работ по герметизации носовой части лодки с целью снижения выхода радионуклидов из корпуса в случае возникновения утечек радиации. В течение 8 экспедиций сделано более 80 погружений ГОА «Мир» на АПЛ «Комсомолец», лежащую на дне, на глубине 1700 метров.

Совместно с ЦКБ МТ «Рубин» и ВМФ РФ разработана методика, которая позволила провести детальное обследование АПКр «Курск», определить причину аварии и разработать методику ликвидации последствий этой аварии.

В 1991 и 1995 гг. с помощью аппаратов «Мир» производились съемки кинофильмов на легендарном затонувшем судне «Титаник», лежащем на глубине 3800 метров. В процессе погружений был обследован корпус «Титаника», который во время аварии развалился на две части, лежащие на расстоянии 600 метров друг от друга, выполнены уникальные киносъемки. В результате работ были созданы широкоформатный фильм IMAX «TITANICA» и голливудский художественный фильм «TITANIC».

В 2003 г. состоялось вручение приза «Подводный Оскар» заведующему Лабораторией научной эксплуатации глубоководных обитаемых аппаратов ИО РАН доктору технических наук Анатолию Михайловичу Сагалевичу Академией подводных наук и искусств США по номинации «Наука». Это самый престижный приз в мире, вручаемый за подводные работы. В России это был первый «Подводный Оскар».

В рамках исследования Арктического бассейна в июле-августе 2007 г. были выполнены погружения аппаратов «Мир» в точке географического Северного полюса. Погружения на Северном полюсе имеют как научное, так и большое историческое значение, ибо аппараты «Мир» выполнили впервые в истории подледные погружения на глубину 4300 метров.

В июле-августе 2008 г. в ходе уникальной научно-исследовательской экспедиции на озеро Байкал глубоководные обитаемые аппараты «Мир-1» и «Мир-2» совершили 52 погружения, благодаря которым учеными был совершен ряд важных открытий, обнаружены нефтеносные породы, сейсмогенные грунты, а также новые микроорганизмы.

Сотрудники Лаборатории НЭГОА награждены Правительственными наградами: Орден Ленина, 5 Орденов Мужества, Орден Трудового Красного Знамени, Орден Знак Почета, Медаль за отвагу, другие медали. В 2008 г. А.М. Сагалевичу и Е.С. Черняеву было присвоено звание Героя Российской Федерации за мужество и героизм, проявленные в экстремальных условиях, и успешное проведение Высокоширотной арктической глубоководной экспедиции.





ГЛА «Мир-2» перед погружением.

В связи с 40-летием первых погружений ПОА «Пайсис» и 30-летием первых погружений ГЛА «Мир» я хотел бы поздравить всех сотрудников Лаборатории научной эксплуатации глубоководных обитаемых аппаратов и других подразделений ИО РАН, которые в разные годы принимали участие в работе по созданию подводных аппаратов и их эксплуатации в различных районах Мирового океана, с этими знаменательными датами.

**XXVI НАУЧНАЯ СЕССИЯ СОВЕТА РАН ПО  
НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ**

**С.И. Бадулин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [badulin.si@ocean.ru](mailto:badulin.si@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 20.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017

18–19 декабря 2017 г. в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН прошла XXVI научная сессия Совета Российской Академии наук по нелинейной динамике. Сессия традиционно проходит в Институте океанологии, начиная с 1992 года. На ней обсуждаются результаты исследований в самых разных областях современной физики от нано-процессов до явлений галактических масштабов. В этом году были представлены 48 устных докладов. В работе Сессии приняли участие специалисты ведущих научных организаций России. К сожалению, в этом году по разным причинам не смогли приехать многолетние участники Сессии из Украины, Узбекистана, Молдавии. В будущем году Сессия пройдет в ставшее привычным время – понедельник-вторник перед новогодней неделей.

Материалы конференции и связанные с этим событием ссылки представлены на сайте Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН:

<https://ocean.ru/index.php/novosti-left/ob-yavleniya/item/757-xxvi-nauchnaya-sessiya-soveta-ran-po-nelinejnoj-dinamike>

**SCIENTIFIC SESSION OF THE COUNCIL OF NONLINEAR  
DYNAMICS OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

**S.I. Badulin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect,  
Moscow, 117997, Russia, e-mail: [badulin.si@ocean.ru](mailto:badulin.si@ocean.ru)*

Submitted 20.12.2017, accepted 25.12.2017

XXVI Scientific Session of the Council of Nonlinear Dynamics of the Russian Academy of Sciences took place in Shirshov Institute of Oceanology December 18-19. This is a traditional event since 1992. Results of current researchers in topical problems of the modern physics and applied mathematics were presented by professionals from leading research institutions of Russia. Unfortunately, our colleagues from Ukraine, Uzbekistan, Moldova who participated in previous sessions have not arrived this year. More than 50 oral talks and poster presentations were discussed. Abstracts and presentations are available at <https://ocean.ru/index.php/novosti-left/ob-yavleniya/item/757-xxvi-nauchnaya-sessiya-soveta-ran-po-nelinejnoj-dinamike>. We are looking forward for seeing the next Session in a year at regular days: Monday-Tuesday just before the Christmas.

**XVI ШКОЛА-СЕМИНАР ИМЕНИ АКАДЕМИКА  
Л.М. БРЕХОВСКИХ «АКУСТИКА ОКЕАНА»**

**А.Н. Серебряный<sup>1</sup>, В.В. Гончаров<sup>1</sup>, А.Г. Островский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [acschool@ocean.ru](mailto:acschool@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 12.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017

Настоящий 45 выпуск научного журнала «Океанологические исследования», издание которого восстановлено после приостановления его публикации в 1993 году, посвящен 100-летию юбилею академика Л.М. Бреховских.

В 1980 г. Л.М. Бреховских предложил организовать регулярную Школу-семинар «Акустика океана», объединившую ученых нашей страны и зарубежных исследователей. В связи с тем, что Школа-семинар имени академика Л.М. Бреховских «Акустика океана» проводится каждые два года, а очередная XVI Школа-семинар пройдет в 2018 году, организационный комитет планирует посвятить 100-летию со дня рождения академика Л.М. Бреховских очередную XVI Школу-семинар. Эта научная конференция будет совмещена с XXXI сессией Российского Акустического Общества (РАО) и станет крупнейшей по своей тематике в России в 2018 г. XVI Школа-семинар пройдет в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН с 29 мая по 1 июня 2018 г. Научная программа конференции после ее формирования будет размещена на сайте Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Оперативная информация о мероприятии также будет размещаться на сайте Института океанологии.

Тематика школы:

- распространение звука в океане,
- рассеяние и отражение звука,
- акустическая океанология (океанологические характеристики, важные для подводной акустики, томография, шумы, экология),
- технические средства, обработка сигналов.



Академик Бреховских  
Леонид Максимович  
(1917–2005)



Приглашаем Вас принять участие в XVI школе-семинаре им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» и XXXI сессии РАО.

Планируется проведение лекций (40 минут), устных докладов (20 минут), а также стендовых докладов. Планируется опубликовать доклады с аннотациями на русском и английском языках в отдельном томе «Акустика океана».

Обращаем ваше внимание, что помимо издания докладов в традиционном формате, по материалам Школы-семинара планируется спецвыпуск журнала «Океанологические исследования». С редколлегией журнала достигнута предварительная договоренность об издании спецвыпуска в объеме примерно 20 статей, каждая не более 10 с., включая рисунки и таблицы. Участники конференции, желающие опубликовать свои статьи по теме докладов в указанном спецвыпуске, должны уведомить Оргкомитет Школы-семинара о том, что ими будут подготовлены соответствующие рукописи статей. Уведомление нужно послать в Оргкомитет в ответ на получение сообщения о том, что доклад принят.

Подача рукописи статьи еще не гарантирует ее публикацию, так как рукопись подлежит рецензированию. Поэтому участник конференции по своему выбору может направить и текст доклада (4 с.) для публикации в томе «Акустика океана» и статью по докладу (10 с.) для рассмотрения вопроса об опубликовании в журнале «Океанологические исследования».

Статьи, оформленные строго по правилам журнала «Океанологические исследования» (см. <http://www.jor.ocean.ru/>), необходимо направить в адрес Оргкомитета Школы-семинара до 16 февраля 2018 г. для предварительного формирования содержания спецвыпуска журнала. Затем статьи будут направлены на «слепое» рецензирование. Окончательные решения о публикации поступивших рукописей принимаются коллегиально на заседании редколлегии журнала.

В заключение отметим, что журнал «Океанологические исследования» – это регулярное рецензируемое издание, индексируемое в CrossRef и РИНЦ.

Более полную информацию о журнале смотрите на сайте:

<http://www.jor.ocean.ru/>.

Почтовый адрес:

Оргкомитет Школы-семинара «Акустика океана»

ИОРАН

117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, 36

Тел.: +7 (499) 129-19-36, факс: +7 (499) 124-59-83, Е-мейл: [acschool@ocean.ru](mailto:acschool@ocean.ru)

**XVI SCHOOL-SEMINAR ACOUSTICS OF THE OCEAN NAMED AFTER  
ACADEMICIAN L.M. BREKHOVSKIKH**

**A.N. Serebryanyi<sup>1</sup>, V.V. Goncharov<sup>1</sup>, A.G. Ostrovskii<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskiy prospect,  
Moscow, 117997, Russia, e-mail: [acschool@ocean.ru](mailto:acschool@ocean.ru)*

Submitted 12.12.2017, accepted 25.12.2017

**Keywords:** L.M. Brekhovskikh, sound scattering, acoustic oceanology, propagation of sound waves in layered media

The Scientific and Organizing Committee of the Academician L.M. Brekhovskikh School-seminar Acoustics of the Ocean in cooperation with Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences organizes the XVI School-seminar combined with the XXXI session of Russian Acoustic Society. This scientific conference commemorating the 100th birth anniversary of Academician L.M. Brekhovskikh will be held in Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, May 29 – June 1, 2018. The conference program along with additional information about the event will be posted at the website <https://www.ocean.ru/>. Notice that in addition to publication of the conference scientific reports in a traditional format in the monograph series Ocean Acoustics, a special issue of the Journal of Oceanological Research based on the materials presented at the meeting is planned. For paper submission requirements visit the site of the Journal of Oceanological Research (<http://www.jor.ocean.ru/>).



**ВОЙТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ: I-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОГИДРОМЕХАНИКИ ОКЕАНА»  
СПТО-2017**

**С.А. Свиридов<sup>1</sup>, В.В. Жмур<sup>1,2</sup>, Р.Ю. Тараканов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36, e-mail: [conf@ocean.ru](mailto:conf@ocean.ru)*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (ГУ), Институтский пер., 9,  
141701, г. Долгопрудный, М.О., Россия*

Статья поступила в редакцию 20.12.2017, одобрена к печати 25.12.2017



С 28 по 30 ноября 2017 года в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН прошла I-я Международная научная конференция: “Современные проблемы термогидромеханики океана – СПТО-2017”, приуроченная к 50-летию кафедры термогидромеханики океана МФТИ (заведующий кафедрой – д.ф.-м.н., профессор В.В. Жмур). Было заслушано более 50 докладов участников конференции, опубликован сборник трудов конференции <http://icot.ocean.ru/index.php/o-konferentsii/sbornik.html>. С приветственным словом и поздравлениями выступил заместитель директора Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, член-корреспондент РАН Завьялов П.О. и заместитель директора школы ФАКТ МФТИ, Рыжаков М.В. с поздравлениями от декана факультета аэрофизики и космических исследований, доцента и директора школы ФАКТ, МФТИ Негодяева С.С. Выступали ветераны кафедры д.ф.-м.н., профессор Кошляков М.Н., д.ф.-м.н. Копелевич О.В., д.ф.-м.н., профессор Резник Г.М. и другие, а также выпускники кафедры разных лет. Свои поздравления в адрес кафедры произнесли выпускники и представители родственных кафедр МГУ, декан географического факультета, член-корреспондент РАН, Добролюбов С.А., зав. кафедрой физики Земли, Физфака МГУ, д.ф.-м.н., профессор Лапшин В.Б., известные ученые и лидеры научных институтов: директор ИФА РАН им. А.М. Обухова, академик Мохов И.И., и.о. генерального директора ГНЦ РФ,

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева» – С.А. Бобков.

Кафедра термогидромеханики океана МФТИ организована в 1967 году, доктором физико-математических наук, профессором Сергеем Сергеевичем Войтом (1920–1987), видным ученым и педагогом, внесшим большой вклад в развитие науки и системы образования в области гидрофизики океана, и ставшего её бессменным руководителем вплоть до 1987 года. Активное участие в создании кафедры приняли известные ученые: от ИО РАН – директор, член-корреспондент АН СССР, академик РАН А.С. Монин, от МФТИ – ректор, академик АН СССР О.М. Белоцерковский и декан факультета аэрофизики и прикладной математики, доцент, полковник авиации Ноздрин В.И. В разные годы руководителями кафедры были: профессор Ястребов В.С. (1989-1992 гг.), профессор Савостин Л.А. (1992–1994 гг.), а с 1994 года по настоящее время кафедрой руководит её воспитанник, д.ф.-м.н., профессор Жмур Владимир Владимирович.

### Благодарности

Большое внимание, проявленное к I-й Международной научной конференции: “Современные проблемы термогидромеханики океана – СПТО-2017”, как со стороны выпускников – научной школы профессора С.С. Войта (МФТИ), так и коллег из других научных институтов и университетов, прежде всего, вызвано интересной тематикой, актуальными докладами высокого уровня и оперативной, слаженной работой Оргкомитета конференции, возглавляемого профессором М.Н. Кошляковым и ответственным секретарём – Н.Б. Степановой (ИО РАН), сумевших в столь ограниченный срок (4 месяца), организовать современный уровень проведения конференции и оперативность информирования, посредством сайта <http://icot.ocean.ru/index.php>, разработанного Андреем Метальниковым, обеспечившего гибкость работы с участниками и авторами докладов, а также online издание сборника трудов конференции. Печатный труд появился как результат профессионального владения материалом главного редактора проф. А.Г. Костяного и верстки докладов, выполненной Наталией Шишкиной.

Успех работы конференции обусловлен, прежде всего, благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №17-05-20579), которому Оргкомитет выражает свою глубокую признательность и благодарность. Деятельное участие в организации и проведении конференции приняли все ее учредители – организаторы, научные институты: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН – ВрИО директора А.В. Соков; Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН – директор ИФА РАН И.И. Мохов, а также представители кафедры термогидромеханики океана Московского физико-технического института (университета) и Московского Университета им. С.Ю. Витте в лице выпускника кафедры – Ректора Университета А.В. Семенова.

С.А. Свиридов и др.

Необходимо отметить безупречную работу группы регистрации под руководством Марии Плаксиной (МФТИ) и высокий профессионализм координационной группы Оргкомитета конференции и сотрудников Отдела информационных технологий, обеспечивших как функционирование всех технических средств, так и регистрацию в индексируемых базах данных РИНЦ и CrossRef.

Учитывая большой интерес к тематике конференции, проявленный участниками конференции и выражая их пожелания, Оргкомитет принял решение о ежегодном проведении конференции по термогидромеханике океана, придав ей историческое и памятное название «Войтовские чтения». II-я Международная конференция состоится в октябре 2019 года. Сроки представления докладов и время проведения конференции будут размещены на сайте <http://icot.ocean.ru/>.

Коллектив редакции и сотрудники Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН поздравляют коллектив кафедры и её выпускников с Юбилеем, желают творческих успехов и высоких достижений на благо российской и мировой науки.

**PROF. VOIT'S MEMORIAL LECTURES: I-ST INTERNATIONAL  
CONFERENCE MODERN PROBLEMS OF THERMOHYDROMECHANICS  
OF THE OCEAN «SPTO-2017»**

**S.A. Sviridov<sup>1</sup>, V.V. Zhmur<sup>1,2</sup>, R.Yu. Tarakanov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow 117997, Russia, e-mail: [conf@ocean.ru](mailto:conf@ocean.ru)*

<sup>2</sup>*Moscow Physical and Technical State University, 9, Institutskiy per.,  
Dolgoprudnyi, 141701, Moscow Region2, Russia*

Submitted 20.12.2017, accepted 25.12.2017

The 1st International Scientific Conference «Modern Problems of Thermohydrmechanics of the Ocean – SPTO-2017» was held from the 28th to 30th of November 2017 in the Shirshov Institute Oceanology of the Russian Academy of Sciences, devoted to the 50th anniversary of the Chair of Thermohydrmechanics of the Ocean of the Moscow Physical Technical Institute (University). Head of the Chair is Professor V.V. Zhmur. More than 50 reports of participants of the conference were made and the Proceedings of the conference <http://icot.ocean.ru/index.php/o-konferentsii/sbornik.html> were published.

# JOURNAL OF OCEANOLOGICAL RESEARCH

2017 Vol. 45 No. 1

Founded in 1959. Issued 6 times a year

Editor-in-Chief: **A.G. Kostianoy**

Editorial board:

**O.R. Anderson (USA), D.A. Astakhov, A.I. Azovskiy, S.I. Badulin, S. Blanc (Argentina), E. Campos (Brazil), A.V. Drits, A.V. Dubinin, M.V. Flint, A.V. Gebruk, S.K. Gulev, L.I. Lobkovskiy, A.G. Matul, E.G. Morozov, O.O. Möller Jr. (Brazil), S.L. Nikiforov, G.V. Novikov, A.G. Ostrovskii, N.A. Rimsky-Korsakov, B.Ya. Rozman, L. Shemer (Israel), V.P. Shevchenko, N.O. Sorokhtin, P.A. Stunzhas, R.Yu. Tarakanov, Jö. Thiede (Germany), A.S. Ulyantsev, V.V. Veltishchev, P.O. Zavialov, G. Zodiatis (Greece)**

Managing Editor: **S.A. Sviridov**

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (IO RAS)  
36, Nakhimovskiy Prospekt, Moscow, 117997, Russia  
Tel. +7 (495) 719-0035, ext. 03-03, e-mail: [jorboard@ocean.ru](mailto:jorboard@ocean.ru)

Редактор-корректор: **А.И. Гинзбург** Editor-proofreader: **A.I. Ginzburg**  
Дизайн обложки и оформление: **Е.В. Сердцева** Cover design: **E.V. Serdtseva**

Компьютерная подготовка оригинал-макета: **Н.А. Шишкина**  
Computer preparation of the original layout: **N.A. Shishkina**

Регистрация РИНЦ, CrossRef: **И.А. Уманская, Ю.В. Новиков**  
eLibrary and CrossRef registration: **I.A. Umanskaya, Yu.V. Novikov**

Техподдержка онлайн версии: **Е.А. Данилин, А.А. Метальников, А.В. Муратов**  
Online support: **E.A. Danilin, A.A. Metalnikov, A.V. Muratov**  
Online version: <https://www.jor.ocean.ru/index.php>

Сдано в набор 15.12.2017 г. Подписано к печати 25.12.2017 г. Формат бумаги 60 × 801/8  
Офсетная печать Усл. печ. л. 22.0 Усл. кр. отт. 6.1 тыс. Уч. изд.л. 30.0 Бум.л. 10.0  
Тираж 150 экз. Зак.

Свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ № ФС77-70841 и ПИ № ФС77-70834 от 30 августа 2017 года  
в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской академии наук

Отпечатано в типографии: ПАО «Т8 Издательские Технологии»  
109316, Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5, офис 6