



# ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2018 Том 46 № 2

Акустика океана  
и морские  
технологии

Морская геология,  
геофизика и  
геохимия

История и  
персоналии

Информация



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. Ширшова



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

## ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2018 Том 46 № 2

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. Бадулин, 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. Ульянцев, 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 46. № 2. М.: ИО РАН. 2018. 224 с.  
Journal of Oceanological Research, Vol. 46, No. 2, Moscow: IO RAS, 2018, 224 p.

DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2)

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, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Акустика океана и морские технологии

- Бреховских А.Л., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Клюев М.С., Ольховский С.В., Ракитин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А.* Разработка основ технологии исследования объектов культурного наследия, погребенных в донных неуплотненных осадках, методом параметрического профилографа с использованием данных спутниковой навигации ..... 5
- Буланов В.А.* Акустическая нелинейность верхнего слоя океана и мелкого моря и особенности рассеяния и поглощения звука..... 15
- Клячин Б.И.* Низкочастотное поле шумов озера Байкал..... 28
- Крюков Ю.С., Черепанов Е.О.* Программные средства обработки гидроакустических сигналов, моделирования и дистанционной оценки координат срабатывания подводных импульсных источников ..... 37
- Носов А.В., Тихонова Н.Ф.* Сравнительный анализ различных способов увеличения продолжительности работы Пингеров без подзарядки..... 47
- Островский А.Г.* Гидроакустическое оборудование автономных подводных профилирующих аппаратов..... 53
- Химченко Е.Е., Серебряный А.Н.* Внутренние волны на кавказском и крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.)..... 69

### Морская геология, геофизика и геохимия

- Заславский Ю.М., Заславский В.Ю.* Трехмерное численное моделирование гидро- и сейсмоакустических волн при зондировании дна на шельфе..... 88
- Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В., Коробов В.Б., Белоруков С.К., Лохов А.С., Яковлев А.Е.* Особенности сезонного распределения взвеси и органического углерода по данным обсерватории «Маргинальный фильтр реки Северная Двина» ..... 96
- Леонов А.В., Пищальник В.М., Петухов В.И., Чичерина О.В.* Трансформация биогенных веществ в водах северо-восточной части шельфа Сахалина: анализ результатов математического моделирования ..... 112
- Лукашин В.Н., Кречик В.А., Бубнова Е.С., Стародымова Д.П., Ключиткин А.А.* Взвесь в Балтийском море: распределение и химический состав ..... 145

*Новигатский А.Н., Клювиткин А.А., Лисицын А.П.* Скорости осадконакопления, вертикальные потоки вещества и абсолютные массы осадков в шельфовой области Российской Арктики ..... 167

### **История и персоналии**

*Кузнецов В.П.* К 40-летию создания Отдела акустики океана в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Краткий очерк истории ..... 180

*Политова Н.В., Демина Л.Л., Шевченко В.П.* К 95-летию Александра Петровича Лисицына..... 194

*Свиридов С.А., Тилинина Н.Д.* Ученый-изобретатель ПЭВМ «ОКЕАН-240», яхтенный капитан Дмитрий Тилинин..... 210

### **Информация**

*Гончаров В.В., Островский А.Г., Свиридов С.А., Серебряный А.Н., Химченко Е.Е., Цыплакова Т.И.* Итоги XVI Школы-семинара имени академика Л.М. Бреховских «Акустика океана» ..... 219

**JOURNAL OF OCEANOLOGICAL RESEARCH, 2018, VOLUME 46, No. 2**

**Ocean Acoustics and Marine Technology**

- Brekhovskikh A.L., Greenberg O.V., Evsenko E.I., Klyuev M.S., Ol'khovsky S.V., Rakitin I.Ya., Sazhneva A.E., Shreider A.A., Shreider A.I.A.* Development of technology based on application of the parametric profilograph using the satellite navigation data for research on the cultural heritage objects, buried in the unconsolidated sea bottom sediments ..... 5
- Bulanov V.A.* Acoustic nonlinearity of the upper ocean and shallow sea and features of the scattering and absorption of sound ..... 15
- Klyachin B.I.* Low frequency field noise of Lake Baikal..... 28
- Kryukov Yu.S., Cherepanov E.O.* Software for processing hydroacoustic signals, modeling and remote evaluation of the coordinates of the triggering of underwater pulsed sources..... 37
- Nosov A.V., Tihonova N.F.* Comparative analysis of different methods for increasing of pinger work time duration without recharging ..... 47
- Ostrovskii A.G.* Hydroacoustic equipment of autonomous underwater profilers..... 53
- Khimchenko E.E., Serebryany A.N.* Internal waves on the Caucasian and Crimean shelves of the Black Sea (according to summer-autumn observations 2011–2016) ..... 69

**Marine Geology, Geophysics and Geochemistry**

- Zaslavsky Yu.M., Zaslavsky V.Yu.* Three dimensional numerical simulation of hydro and seismic-acoustic waves by shelf bottom profiling..... 88
- Kochenkova A.I., Novigatsky A.N., Gordeev V.V., Korobov V.B., Belorukov S.K., Lokhov A.S., Yakovlev A.E.* Features of seasonal distribution of a suspended matter and organic carbon according to «Marginal Filter of the River Severnaya Dvina» Observatory ..... 96
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., Petukhov V.I., Chicherina O.V.* Transformations of nutrients in the Northeastern waters of the Sakhalin Shelf: An analysis of mathematical modeling results ..... 112
- Lukashin V.N., Krechik V.A., Bubnova E.S., Starodymova D.P., Klyuvitkin A.A.* Suspended matter in the Baltic Sea: Distribution and Chemical composition.... 145
- Novigatsky A.N., Klyuvitkin A.A., Lisitzin A.P.* The speed of sedimentation, vertical flow of matter, and the absolute mass of precipitation in the shelf region of the Russian Arctic ..... 167

### History and Personalities

<i>Kuznecov V.P.</i> To the 40th anniversary of the creation of the Ocean Acoustics Department at the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. Summary of History .....	180
<i>Politova N.V., Demina L.L., Shevchenko V.P.</i> To the 95th anniversary of Alexander Petrovich Lisitzin.....	194
<i>Sviridov S.A., Tilinina N.D.</i> Scientist inventor of the PC «OCEAN-240», yacht captain Dmitry Tilinin.....	210

### Information

<i>Goncharov V.V. , Ostrovskii A.G., Sviridov S.A., Serebryanyi A.N., Khimchenko E.E., Tsyplakova T.I.</i> Summary of the XVI School-seminar «Ocean Acoustics» named after academician L.M. Brekhovskikh .....	219
--	-----

## РАЗРАБОТКА ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ, ПОГРЕБЕННЫХ В ДОННЫХ НЕУПЛОТНЕННЫХ ОСАДКАХ, МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

А.Л. Бреховских<sup>1</sup>, О.В. Гринберг<sup>1</sup>, Е.И. Евсенко<sup>1</sup>, М.С. Клюев<sup>1</sup>,  
С.В. Ольховский<sup>2</sup>, И.Я. Ракитин<sup>1</sup>, А.Э. Сажнева<sup>1</sup>, А.А. Шрейдер<sup>1</sup>,  
Ал.А. Шрейдер<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, 117997, e-mail: [mklyuev@mail.ru](mailto:mklyuev@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт археологии РАН, Москва, 117036, e-mail: [ptakkon@yandex.ru](mailto:ptakkon@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 14.02.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Рассматриваются основы технологии изучения объектов культурного наследия (ОКН), погребенных в донных неуплотненных осадках, с помощью параметрического профилографа с использованием данных спутниковой навигации. Рассмотрены четыре основных компонента технологии, а именно: гидроакустическое профилографирование, спутниковая навигация, методики натурных исследований и алгоритмы обработки данных. Описан Комплекс гидроакустического параметрического профилографирования и GPS позиционирования, предназначенный для исследования ОКН в донных антропоценовых осадках с маломерных судов. Представлены результаты применения Комплекса для изучения ОКН в подводной части древней Фанагории и древнего Патрея. Приведены результаты применения Комплекса на затопленном линкоре «Екатерина Великая». По результатам натурных исследований делается вывод об адекватности и эффективности разрабатываемой технологии.

**Ключевые слова:** объекты культурного наследия, параметрический профилограф, спутниковая навигационная система, неуплотненные морские осадки, технология изучения донных объектов

### Введение

Выявление и изучение объектов культурного наследия (ОКН) в подводной среде является одной из актуальных задач современных океанологических исследований. К таким объектам относятся затопленные поселения, портовые сооружения, здания, суда, вооружение, механические и бытовые предметы и т.п. Они могут находиться на морском дне или в слое донных осадков, а их размеры варьируются от десятых долей метра до тысяч метров.

Исследования подводных ОКН подразумевают выполнение ряда специфических задач: выявление объектов под водорослями, под слоем ила и в толще дна, точную привязку к географическим координатам, дистанционную идентификацию возможного типа объекта и т.п. Это влечет использование комплексного подхода, базирующегося на совокупности методик, которые создают основу технологии исследования ОКН.

Как показали многочисленные натурные исследования (Ключев и др., 2015; Шрейдер и др., 2016; Шрейдер и др., 2017), технология изучения подводных ОКН должна включать следующие составляющие: гидроакустические (и иные) средства зондирования поверхности и толщи дна, спутниковые морские навигационные системы, специализированные методики натурных исследований, алгоритмы и методики распознавания ОКН, а также возможные априорные сведения об ОКН.

### **Основы технологии**

Наиболее подходящими гидроакустическими средствами для исследования ОКН зарекомендовали себя узколучевые эхолоты и узколучевые параметрические профилографы. Эти приборы используют вертикальное зондирование, что исключает эффект искривления звуковых лучей (рефракцию), вследствие вертикальной изменчивости профиля скорости звука, а также обладают узкой (единицы градусов) диаграммой направленности. Рабочие частоты этих приборов позволяют различать объекты с размерами до единиц сантиметров (эхолоты) и десятка сантиметров (профилографы) и проводить исследования на нескольких частотах одновременно. Кроме того, параметрические профилографы позволяют визуализировать внутреннюю структуру морского дна и расположенные в нем объекты. Аппараты, работающие в группе, могут обеспечивать повышенную площадную производительность (Бреховских и др., 2017).

При площадных поисках ОКН могут оказаться полезными гидролокаторы бокового обзора и многолучевые эхолоты, которые, однако, обладают рядом недостатков – рефракцией, невозможностью изучения структуры осадочной толщи и т.п. Кроме того, перспективными приборами при поисках ОКН являются магнитометры, которые реагируют лишь на металлические предметы.

Применение спутниковых морских навигационных систем является важной компонентой технологии исследования подводных ОКН. Эти системы способны обеспечивать навигационную привязку гидроакустических (и иных) приборов с точностью до долей дециметра в морских условиях. Это позволяет обобщать результаты исследований ОКН, выполненных на разных галсах и маневрах судна-носителя в различное время.

Еще одной компонентой рассматриваемой технологии являются специализированные методики натурных исследований, в том числе галсовые маневры судна-носителя, галсовые маневры под углом к первоначальным, маневры типа «розочка» (заходы на объект с разных сторон света), повторные маневры и т.п.

На завершающем этапе применяются алгоритмы и методики обнаружения и распознавания ОКН. Эти методики основаны на использовании целого ряда критериев наличия гидроакустических аномалий (по данным первого и кратного отражений); совместном анализе информации эхолота, профилографа, магнитометра. Учитываются различные значения порогов сигнала, используются псевдоцвета при обработке изображений, группируются выявленные аномалии в линии, цепочки и области и т.п.

Априорная информация об ОКН также является важной компонентой рассматриваемой технологии. Это предполагает использование особенности внутренней пространственной упорядоченности ОКН, в зависимости от типа объекта (таблица 1) и исторического фона их происхождения. Вследствие чего, для распознавания ОКН также используются «ассоциированные» («ориентированные») алгоритмы, априорно предполагающие наличие соответствующего вида упорядоченности у исследуемого объекта на основе его предварительного изучения.

Таблица 1.

Тип объекта	Вид упорядоченности
поселение	улицы, площади, рвы, дороги
портовые сооружения	молы, защиты акваторий
здания	фундаменты, стены, башни
суда	борта, надстройки, палубы, мачты
вооружения, механизмы, предметы	внутреннее устройство

Таким образом предлагаемая технология изучения ОКН включает следующие компоненты:

1. Использование узколучевого многочастотного параметрического профилографа в качестве основного оборудования.
2. Использование эхолота, гидролокатора бокового обзора, многолучевого эхолота, магнитометра, георадара и иных устройств в качестве вспомогательного оборудования.
3. Использование систем спутниковой морской навигации.
4. Использование специализированных методик морских натуральных исследований.
5. Использование априорной информации об ОКН, в том числе о видах пространственной упорядоченности ОКН.

#### Аппаратура и методики

На основе этих принципов в ИО РАН в 2014–2017 гг был разработан Комплекс гидроакустического параметрического профилографирования и GPS позиционирования антропоценовых донных осадков с маломерных судов. Комплекс включает: низкочастотный параметрический донный профилограф и высокочастотный эхолот (на базе прибора SeaKing DST и программного обеспечения SeaNet), приемник спутниковой навигации GPS/ГЛОНАС (на базе прибора Trimble BX982), комплекс судовождения (на основе программного обеспечения AquaScan), управляющий компьютер (ноутбук Panasonic CF-31), устройство автономного питания и средства крепления элементов системы на маломерных судах (Клюев и др., 2015).

Этот комплекс позволяет производить площадные галсовые съемки полигонов с маломерных судов и анализировать информацию об осадках, одновременно

полученную с различных приборов, а также делать заключения об их свойствах, структуре и включениях. Он позволяет получать, отображать в псевдоцвете и записывать информацию о профиле дна и объектах водной толщи на высокой частоте и структуре объектов на дне и в водной толще на низкой частоте с привязкой к данным спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС в реальном режиме времени при движении маломерного судна по заданной траектории.

Одновременно были разработаны методики и алгоритмы обнаружения и определения ОКН, их структуры в соответствии со специальными критериями с использованием штатного программного обеспечения и оригинальных подходов (Ключев М.С. и др., 2016).

При идентификации и распознавании донных структур и объектов учитывалось:

- наличие возвышений, понижений и водорослей на дне;
- наличие в толще дна или на его поверхности областей с повышенным (пониженным) обратным откликом гидроакустического сигнала относительно прилегающих областей;
- нарушение однородности донных слоев, границ слоев, рельефа дна или водорослей;
- совместимость информации эхолота и профилографа;
- особенности записей сигнала при различных значениях порогов и в разных псевдоцветах;
- наличие подобных особенностей на первом кратном отражении;
- наличие подобных особенностей на соседних галсах и объединение особенностей в цепочки.

## Результаты

С помощью комплекса было проведено гидроакустическое профилирование полигона в морской части Государственного историко-археологического музея-заповедника (ГИАМЗ) «Фанагория» на берегу Таманского залива Краснодарского края вблизи п. Сенной. Целью исследований было изучение возможностей комплекса по выявлению структур и объектов культурного наследия, погребенных в донных антропоценовых осадках морской части ГИАМЗ «Фанагория» (около 2500 лет назад), а также апробация алгоритмов их обнаружения, распознавания и картографирования.

Полигон имел вид прямоугольника, вытянутого в направлении примерно запад–восток (азимут около  $80^\circ$ ) с размерами около  $1400 \times 300$  метров. Точки углов полигона имели координаты:  $36^\circ 56.940'$  в.д.  $45^\circ 16.600'$  с.ш. (юго-западный),  $36^\circ 56.940'$  в.д.  $45^\circ 16.840'$  с.ш. (северо-западный),  $36^\circ 57.980'$  в.д.  $45^\circ 16.760'$  с.ш. (юго-восточный),  $36^\circ 57.980'$  в.д.  $45^\circ 16.940'$  с.ш. (северо-восточный). При проведении исследований было выполнено 52 продольных галсов с шагом 5 м и 8 поперечных галсов.

Глубины в месте проведения исследований составляли от 0.5 до 3.5 м. Дно складывается осадочными илами и песком с включением ракушек, местами образующими ракушечные слои. Оно было частично покрыто водорослями различной густоты высотой до метра. Аппаратура позволяла визуализировать структуру дна примерно на 2 м в его толщу при отсутствии водорослей и примерно на 1 м при их наличии.

При обследовании полигона маломерное судно с системой двигалось по сетке галсов, охватывающей полигон, со скоростью около 2 узлов. В результате были получены гидроакустические разрезы формы дна и его внутренней структуры с привязкой к географическим координатам.

В результате обработки был выявлен целый ряд донных структур и объектов, положения которых были нанесены на план полигона (рис. 1), построенный с помощью компьютерной программы Global Mapper в универсальной поперечной проекции Меркатора UTM зона 37 (36°E–42°E северной геосферы, метры север/юг – метры запад/восток) в системе координат WGS84.

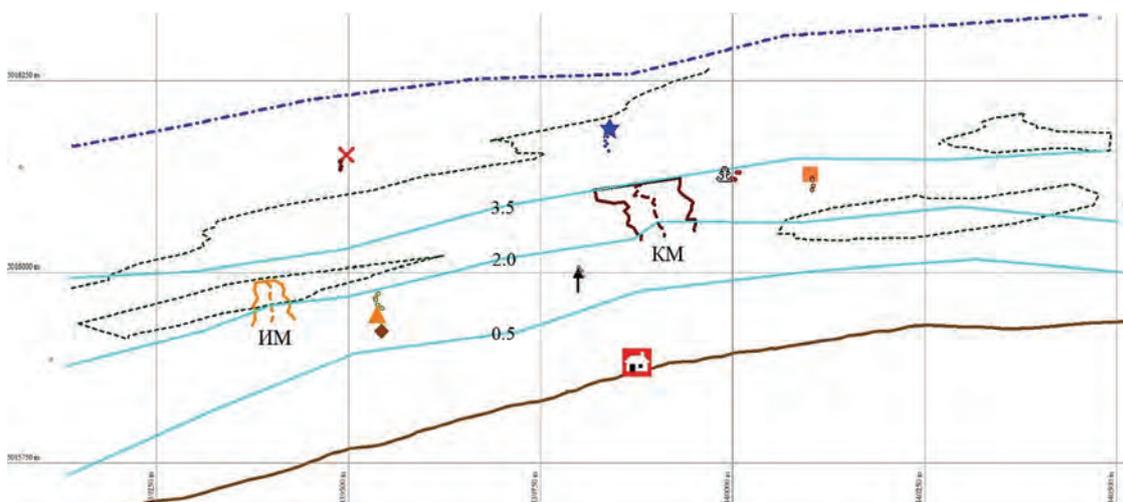


Рис.1. План подводной части ГИАМЗ «Фанагория»

Обозначения: нижняя коричневая сплошная линия – южная береговая линия; синяя верхняя пунктирная линия – северная морская граница полигона; дом – причал, лагерь; красный крест – затопленный подъемный кран; оранжевый квадрат – затопленный перевернутый баркас; синяя звезда – затопленный пароход; черная стрелка – затопленная галера; якорь – затопленные турецкие якоря; желтый треугольник – древний ряз (пристань); коричневый ромб – насыпной островок; КМ (бордовая линия) – границы каменного мола (пунктир – его вершина); ИМ (песочная линия) – граница известнякового мола (пунктир – его вершина); зеленая пунктирная линия в левом верхнем углу – граница водорослей (слева – нет, справа – есть); зеленые пунктирные линии – участки без водорослей; голубые сплошные линии – батиметрия 0.5, 2 и 3.5 м, считая от берега.

Отметим, что перечисленные объекты были независимо выявлены в результате исследований Института археологии РАН и ГИАМЗ «Фанагория» в ходе водолазных работ, что подтверждает эффективность комплекса и методик обработки данных по выявлению ОКН, погребенных в донных морских антропоценовых осадках.

Еще одним интересным объектом, расположенным вблизи Фанагории, в затопленной части античного поселения Патрей, является так называемый «Развал камней» («Развал») с координатами  $36^{\circ} 50.311'$  в.д. и  $45^{\circ} 18.738'$  с.ш. Он находится на расстоянии около 250 м южнее береговой линии на глубине от 2 до 3 м. Дно в районе «Развала» слагается песчаными илами с включением ракушек, образующими ракушечные внутридонные слои, и частично покрыто водорослями высотой до 1 м. Сам «Развал» состоит из камней различной величины, которые образуют скопление размером около  $100 \times 100$  м. В пределах этого скопления были зафиксированы участки сохранившегося культурного слоя, фрагменты керамических сосудов VI–V вв. до н.э.

Изучение «Развала» производилось методом получения его профилографических разрезов при движении системы под различными азимутами (метод сечения азимутальными галсами) с привязкой к географическим координатам. Обработка данных проводилась согласно разработанным методикам и алгоритмам (Шрейдер и др., 2017).

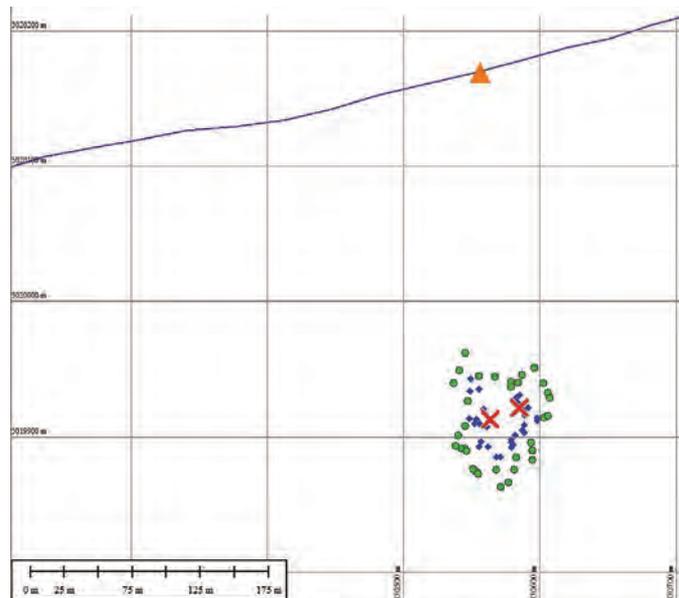


Рис.2. План подводного «Развала камней» у поселения Патрей. Обозначения: зеленые кружки – положение внешней границы «фундамента» «Развала», синие ромбы – положение «стен», красные кресты – положение «вершин», синяя линия – береговая линия городища, оранжевые треугольники – положение поселения Патрей на урезе воды

Для обозначения структур «Развала» использовались условные понятия положения «фундамента», «стен» и «вершин», которые определялись следующим образом:

- положение «фундамента» «Развала» определялось как излом линии дна (нарушение структуры дна) на границе объекта;
- положение «стен» «Развала» определялось как положение локальных максимумов высот объекта;
- положение «вершин» объекта определялось как положение абсолютных максимумов высот «Развала».

Положения «фундамента», «стен» и «вершин» «Развала» были определены для всех 16 разрезов и нанесены на план (рис. 2) с помощью компьютерной программы Global Mapper в универсальной поперечной проекции Меркатора UTM зона 37 (36°Е–42°Е северной геосферы, метры север/юг – метры запад/восток) в системе координат WGS84.

Полученный план позволяет сделать вывод, что «Развал камней» имеет правильную упорядоченную структуру прямоугольной формы размерами около 100×100 м. Точки «фундамента» и «стен» «Развала» выстраиваются в прямые отрезки, ориентированные по сторонам света: северо-запад, юго-восток и юго-запад, северо-восток. Возможно, они соответствуют положению реальных фундаментов и стен сооружения, построенного по определенному плану и содержащему регулярные структуры, например, крепости.

По данным геохронологии и анализу культурного слоя, возраст «Развала» составляет около 2600–2300 лет. Эти значения соответствуют так называемой фанаторийской регрессии (2600–2300 лет назад), когда уровень окрестных вод понизился на 5–6 м вследствие поднятия дна, вызванного, скорее всего, древним землетрясением. В результате возникла необходимость строительства сооружения (возможно, крепости) на осушенных территориях ближе к урезу воды, которые впоследствии, при окончании регрессии, погрузились под воду (Шрейдер А.А. и др., 2017).

Еще одной важной областью применения технологии изучения ОКН является исследование затонувших судов. С ее помощью был исследован линкор «Екатерина Великая» («Свободная Россия») вблизи м. Доб в Цемесской бухте.

Линкор «Екатерина Великая» спущен на воду 24.05.1914 в г. Николаев, вступил в строй 5.10.1915, переименован в «Свободную Россию» 18.04.1917, во избежание захвата интервентами в ходе Гражданской войны, 19.06.1918 был затоплен своими торпедной атакой эсминца «Керчь». Длина линкора около 170 м, ширина около 28 м, осадка около 8.4 м.

Точки углов полигона имели примерные координаты: 37° 53.860′ в.д. 44° 36.450′ с.ш. (северо-западный), 37° 53.860′ в.д. 44° 36.338′ с.ш. (юго-западный), 37° 53.934′ в.д. 44° 36.450′ с.ш. (северо-восточный), 37° 53.934′ в.д. 44° 36.338′ с.ш. (юго-восточный). При исследовании линкора было выполнено 10 продольных (направление юг-север) и 22 поперечных (направление запад-восток) галсов.

На рис. 3 представлены двумерное (а) и трехмерное (б) изображения линкора «Екатерина Великая» на морском дне, построенные с помощью компьютерной программы Global Mapper в универсальной поперечной проекции Меркатора UTM зона 37 (36°Е–42°Е северной геосферы, метры север/юг – метры запад/восток) в системе координат WGS84. Примененные методики позволили получить высокую пространственную детализацию расположения линкора. В частности, удалось обнаружить и картографировать воронку (синяя область на рис. 3) от взрыва его боезапаса, произошедшего в 1930-х годах, при попытке его подъема, о которой ранее было неизвестно.

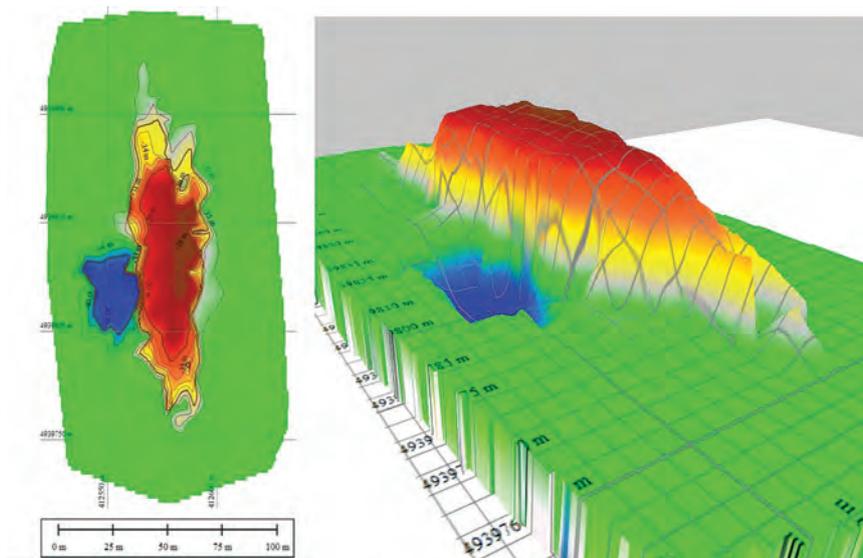


Рис. 3. Двумерное (а) и трехмерное (б) изображение линкора «Екатерина Великая» («Свободная Россия») на морском дне

### Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности принципов технологии изучения ОКН, высокой эффективности комплекса при исследовании донных и внутридонных ОКН, а также об адекватности и эффективности методик и алгоритмов их поиска и распознавания. Работа выполнена в рамках Проекта Президиума РАН №0149-2018-0026 ПП РАН 1.56 «Разработка фундаментальных основ технологии использования параметрических гидроакустических средств для поиска, идентификации и мониторинга объектов в воде, на поверхности дна и в осадках» и Проекта РФФИ № 17-05-00075 «Палеогеодинамика пролива Дрейка».

### Литература

- Бреховских А.Л., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Ключев М.С., Ольховский С.В., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А. О структурах и объектах донного антропоцена в ГИАМЗ «Фанагория» // *Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2017» «Современные методы и средства океанологических исследований»*. Т. 1. Москва: АПР, 2017. С. 251–254.
- Бреховских А.Л., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Ключев М.С., Ольховский С.В., Ракин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А. О повышении площадной производительности гидроакустических параметрических профилографов // *Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2017» «Современные методы и средства океанологических исследований»*. Т. 1. Москва: АПР, 2017. С. 268–271.
- Ключев М.С., Ольховский С.В., Шрейдер А.А. О модели подводной территории ГИАМЗ «Фанагория» // *Сборник тезисов докладов школы «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах»*. Москва: ООО «ПРИНТ ПРО», 2016. С. 102–105.

- Клюев М.С., Ольховский С.В., Фазлуллин С.М., Сажнева А.Э., Евсенко Е.И., Шрейдер Ал.А. О возможностях системы параметрического профилографа, эхолота и приемника ГЛОНАСС/GPS для комплексных исследований донных антропоценовых осадочных отложений // Материалы XXI Международной научной конференции (школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». Том V. Москва. ГЕОС, 2015. С. 132–136.
- Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А., Клюев М.С., Евсенко Е.И. Высоко-разрешающая геоакустическая система для геолого-археологического изучения дна // Процессы в геосредах. 2016. № 2(6). С. 156–161.
- Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Галиндо-Зальдивар Х., Клюев М.С., Евсенко Е.И., Ольховский С.В., Сажнева А.Э., Захаров Е.В., Чижиков В.В., Бреховских А.Л., Ракитин И.Я., Гринберг О.В. Первые данные геолого-археологического изучения Патрейского шельфа Таманского залива Черного моря // Процессы в геосредах. 2017. № 2 (11). С. 557–562.

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY BASED ON APPLICATION OF THE  
PARAMETRIC PROFILOGRAPH USING THE SATELLITE NAVIGATION  
DATA FOR RESEARCH ON THE CULTURAL HERITAGE OBJECTS,  
BURRIED IN THE UNCONSOLIDATED  
SEA BOTTOM SEDIMENTS**

**A.L. Brekhovskikh<sup>1</sup>, O.V. Greenberg<sup>1</sup>, E.I. Evsenko<sup>1</sup>, M.S. Klyuev<sup>1</sup>,  
S.V. Ol'khovskiy<sup>2</sup>, I.Ya. Rakitin<sup>1</sup>, A.E. Sazhneva<sup>1</sup>, A.A. Shreider<sup>1</sup>, Al.A. Shreider<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>*Institute of Archeology Russian Academy of Sciences, Moscow, 117036, Russia  
e-mail: [ptakkon@yandex.ru](mailto:ptakkon@yandex.ru)*

Submitted 14.02.2018, accepted 18.06.2018

The paper concerns with foundations of technology for exploration of cultural heritage objects (CHO) buried in bottom unconsolidated sediments using the parametric profiler method and satellite navigation data. Four of the technology main components namely profilograph sonar, satellite navigation, field study techniques and algorithms of data processing are considered. The system of parametric profilograph sonar and GPS satellite navigation, intended for CHO research in bottom antropocene sediments from small ships, based on these components is considered. The results of the application of the System for the study of CHO in the underwater part of ancient Fanagoria and ancient Patrei are presented. The results of application of the Complex on the submerged battleship «The Great Ecatherine» are also presented.

**Keywords:** cultural heritage objects, parametric profiler, satellite navigation system, unconsolidated sea sediments, technology of bottom objects study

**References**

- Brekhovskikh A.L., Grinberg O.V., Evsenko E.I., Klyuev M.S., Ol'khovskii S.V., Sazhneva A.E., Shreider A.A., and Shreider Al.A. О структурakh и об'ектах донного антропоцена в GIAMZ «Fanagoriya» (About the structures and objects of the bottom anthropocene in the*

GIAMZ «Fanagoria»), *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy* (Modern methods and means of oceanological research), Proceedings of the XV All-Russian Scientific and Technical Conference «MSOI-2017», Moscow: APR, 2017, Vol. 1, pp. 251–254.

*Brekhovskikh A.L., Grinberg O.V., Evsenko E.I., Klyuev M.S., Ol'khovskii S.V., Rakitin I. Ya., Sazhneva A.E., Shreider A.A., and Shreider Al.A.* O povyshenii ploskhnadnoi proizvoditel'nosti gidroakusticheskikh parametricheskikh profilografov (About the increase of the area performance of hydroacoustic parametric profilographs), *Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy* (Modern methods and means of oceanological research), Proceedings of the XV All-Russian Scientific and Technical Conference «MSOI-2017», Moscow: APR, 2017, Vol. 1, pp. 268–271.

*Klyuev M.S., Ol'khovskii S.V., and Shreider A.A.* O modeli podvodnoi territorii GIAMZ «Fanagoriya» (About the model of the underwater territory of GIAMZ «Fanagoria»), *Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie protsessov v geosredakh* (Physical and mathematical modeling of processes in geo-environments), Collection of theses of the school reports, Moscow: ООО «PRINT PRO», 2016, pp. 102–105.

*Klyuev M.S., Ol'khovskii S.V., Fazlullin S.M., Sazhneva A.E., Evseenko E.I., and Shreider Al.A.* O vozmozhnykh sistemy parametricheskogo profilografa, ekholota i priemnika GLONASS/GPS dlya kompleksnykh issledovaniy donnykh antropotsenovykh osadochnykh otlozhenii (About the capabilities of the system of a parametric profiler, a sonar and a GLONASS / GPS receiver for complex studies of bottom anthropocene sedimentary deposits), *Geologiya morei i okeanov* (Geology of the seas and oceans), Materials of the XXI International Scientific Conference (School) in Marine Geology, Moscow: GEOS, 2015, Vol. 5, pp. 132–136.

*Shreider A.A., Shreider Al.A., Klyuev M.S., and Evsenko E.I.* Vysoko-razreshayushchaya geoakusticheskaya sistema dlya geologo-arkheologicheskogo izucheniya dna (High resolution geoacoustic system for geological and archaeological study of the bottom), *Protsessy v geosredakh*, 2016, No. 2(6), pp. 156–161.

*Shreider Al.A., Shreider A.A., Galindo-Zal'divar Kh., Klyuev M.S., Evsenko E.I., Ol'khovskii S.V., Sazhneva A.E., Zakharov E.V., Chizhikov V.V., Brekhovskikh A.L., Rakitin I.Ya., and Grinberg O.V.* Pervye dannye geologo-arkheologicheskogo izucheniya Patreiskogo shel'fa Tamanskogo zaliva Chernogo morya (The first data of the geological and archeological study of the Patray shelf of the Taman Bay of the Black Sea), *Protsessy v geosredakh*, 2017, No. 2(11), pp. 557–562.

## АКУСТИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА И МЕЛКОГО МОРЯ И ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА

В.А. Буланов

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, д.43. e-mail: [bulanov@poi.dvo.ru](mailto:bulanov@poi.dvo.ru)*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 27.08.2018

Морская среда характеризуется наличием различных мелкомасштабных неоднородностей, которые существуют как вблизи поверхности моря, так и в толще: газовые пузырьки, различные взвеси, планктон различных размеров, микротурбулентность. Все перечисленные неоднородности добавляют свой вклад в акустические характеристики морской среды, среди которых важными для гидроакустики являются нелинейные характеристики. Несмотря на важность параметра нелинейности для морской среды информация о его измерениях в море весьма скудна. В работе обсуждены особенности нелинейных и линейных акустических характеристик морской воды, содержащей мелкомасштабные неоднородности. Представлены результаты исследований акустической нелинейности морской воды и поглощения звука на различных глубинах *in situ*. Проведено сравнение локальных акустических характеристик и коэффициентов обратного рассеяния звука в верхнем слое океана до глубины около 100 м. Показано, что акустические характеристики существенно изменяются с глубиной и наблюдаемые аномалии поглощения и нелинейности обусловлены присутствием гетерогенных включений. Показано, что особенности пространственной структуры коэффициента рассеяния звука обусловлены изменением структуры пузырьковых облаков, вовлекаемых ветровыми напряжениями и индуцированными течениями при скорости ветра до 12 м/с. Обсуждена взаимосвязь рассеяния и поглощения звука с акустической нелинейностью морской воды. Показана возможность прогнозирования распределения акустической нелинейности и поглощения звука в океане и в мелком море на основе дистанционных данных по обратному рассеянию звука.

**Ключевые слова:** акустическая нелинейность, рассеяние, поглощение звука, морская вода, верхний слой океана, пузырьки, мелкое море

### Введение

Наиболее часто в океане встречаются мелкомасштабные неоднородности. Между различными типами неоднородностей в океане существует определенная иерархия по интенсивности или «силе рассеяния» и затухания звука (Андреева, 1974; Vagle, McNeil, Steiner, 2010). Морская вода содержит различные гетерогенные и гомогенные неоднородности, такие как пузырьки, твердые и мягкие взвеси, планктон, турбулентные образования и т.п. Особое положение среди них имеют газовые пузырьки, которые всегда присутствуют в приповерхностных слоях моря и особенно велика их роль при больших скоростях ветра и при сильном ветровом волнении (Deane, 1997; Andreas, Monahan, 2000; Garrett, Li, Farmer, 2000; Vagle, McNeil, Steiner, 2010). Создание эффективных методов для изучения мелкомасштабных

неоднородностей составляет одну из актуальных задач современной океанологии. В последнее время стало ясно, что наряду с традиционными линейными методами акустической диагностики океана возникла необходимость разработки других, более совершенных методов (Есипов, Рыбак, Серебряный, 2006; Кузнецов, 2010; Akulichev, Bulanov, 2011; Grelowska, Kozaczka, 2015). Таковыми оказались, прежде всего, нелинейные методы, а также методы, использующие анализ более тонких, нестационарных эффектов рассеяния и распространения звука в микронеоднородных средах (Есипов, Рыбак, Серебряный, 2006; Кузнецов, 2010; Akulichev, Bulanov, 2011; Акуличев, Буланов, 2017).

Нелинейные эффекты чувствительны к присутствию микронеоднородностей в воде, поэтому наряду с непосредственным измерением параметров термодинамического состояния морской воды и скорости звука – первой производной  $c = (\partial \rho / \partial P)_s^{-1/2}$  (где  $\rho$  – плотность,  $P$  – давление,  $s$  – энтропия), можно использовать параметр  $\varepsilon$ , связанный со второй производной уравнения состояния, который может стать информативным признаком для диагностики морской среды.

Характеристикой отклонения от линейности жидкости является зависимость скорости звука от амплитуды вида  $\Gamma = \rho (\partial c^2 / \partial P)_s$  и нелинейный акустический параметр, связанный с  $\Gamma$  соотношением (Есипов, Рыбак, Серебряный, 2006), (Кузнецов, 2010):

$$\varepsilon = 1 + (\rho / 2) (\partial c^2 / \partial P)_s \equiv 1 + \Gamma / 2 \quad (1)$$

В жидкостях, содержащих различные фазовые включения, параметр нелинейности может значительно возрасти. Особенно сильно это проявляется для жидкостей, содержащих газовые пузырьки (Есипов, Рыбак, Серебряный, 2006; Grelowska, Kozaczka, 2015; Akulichev, Bulanov, 2015), для которых  $\varepsilon$  будет зависеть от структуры среды, а также от динамических характеристик включений. В толще морской среды дополнительно существуют различные взвеси, планктон различных размеров, микротурбулентность, которые добавляют свой вклад в нелинейность. Несмотря на важность параметра нелинейности для морской среды информация о его измерениях в море весьма скудна (Есипов, Рыбак, Серебряный, 2006, Кузнецов, 2010; Grelowska, Kozaczka, 2015; Akulichev, Bulanov, 2015). В работе обсуждены особенности нелинейных и линейных акустических характеристик морской воды, содержащей мелкомасштабные неоднородности.

### **Измерения акустической нелинейности и поглощения звука в морской воде**

Существует ряд методов измерения акустической нелинейности (Есипов, Рыбак, Серебряный, 2006; Кузнецов, 2010; Grelowska, Kozaczka, 2015; Буланов, Корсков, Попов, 2017). Одним из наиболее простых методов, позволяющего его реализовать на практике в виде небольшого зондирующего устройства, является метод измерения расстояния, на котором развиваются нелинейные эффекты, – расстояние разрыва в волне  $r^* = 1 / \varepsilon k M$ , где  $k = \omega / c = 2\pi f / c$  – волновое число,  $f$  – частота,  $M = P_m / \rho c^2$  – число Маха,  $P_m$  – амплитуда давления в звуковой волне.

Измеряя расстояние  $r^*$ , можно определить нелинейный параметр  $\varepsilon$  по формуле (Буланов, Корсков, Попов, 2017)  $\varepsilon = \rho c^3 / (2\pi f P_m r^*)$ .

На практике измерения  $r^*$  можно провести непосредственно вдоль прямой распространения, но сделать это можно лишь в случае большой нелинейности среды, когда  $r^*$  мало по сравнению с размерами  $L$  измерительной ячейки или области измерения. При небольшой нелинейности накопление нелинейных эффектов в пространстве происходит медленно, поэтому  $r^*$  может оказаться чрезмерно большим и не дающим возможность реализовать устройство со сравнительно небольшими размерами, которое обычно требуется для практических применений в морских условиях. Поэтому на практике измерения  $r^*$  происходят при учете последовательных отражений акустических импульсов между стенок измерительной ячейки (Буланов, Корсков, Попов, 2017).

Более универсальный метод, позволяющий измерять частотные особенности параметра акустической нелинейности, заключается в измерении амплитуды волн разностной частоты  $P_\Omega$  и накачки  $P_\omega$  на расстоянии  $r$ ; – в этом случае можно определить величину нелинейного акустического параметра по следующей формуле (Буланов, Корсков, Попов, 2017), (Акуличев, Буланов, 2017):

$$\varepsilon = A(\omega, \Omega) \frac{P_\Omega r}{P_{\omega 1} P_{\omega 2}}, \quad A(\omega, \Omega) = \frac{4\rho c^3}{R_{F\omega}^2 \Omega \ln(2\gamma_E N_A^{-2})}. \quad (2)$$

где  $P_{\omega 1}$ ,  $P_{\omega 2}$ ,  $P_\Omega$  – амплитуды давления волн накачки с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и разностной частоты  $\Omega$  ( $\omega_{1,2} = 2\pi f_{1,2}$ ,  $\Omega = 2\pi F$ ,  $F = f_1 - f_2$ ),  $N_A = (\alpha_\omega R_{F\omega})^{1/2}$ ,  $\gamma_E = 1,78$  – постоянная Эйлера,  $R_{F\omega} = k_\omega d^2 / 8$  – длина ближней зоны на частоте  $\omega$ ,  $k_\omega = \omega / c$ ,  $d$  – апертура излучателя.

На практике часто используется относительный метод измерения нелинейного акустического параметра, заключающийся в предварительной калибровке измерителя в известной среде и затем вычисления  $\varepsilon$  по формуле  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot (U_\Omega / U_{\Omega 0})$ , где  $\varepsilon_0$  и  $U_{\Omega 0}$  – величины, соответствующие эталонному образцу (Акуличев, Буланов, 2017),  $U_w$  – амплитуда сигнала в реальных измерениях.

Аналогично измерению нелинейного параметра в измерительной ячейке можно использовать относительный метод для измерения поглощения звука  $\alpha$  на достаточно высоких частотах. В этом случае вычисления  $\alpha$  можно провести по формуле  $\alpha_\omega = \alpha_0 \cdot (\ln U_{\omega 0} - \ln U_\omega)$ , где  $\alpha_0$ ,  $U_{\omega 0}$  – параметры, соответствующие эталонному образцу (Акуличев, Буланов, 2017). При достаточно малых потерях при отражениях от стенок и при условии хорошей юстировки параллельности отражающих стенок величину поглощения звука  $\alpha$  можно определить по формуле  $\alpha_w = (\ln U_{w1} - \ln U_{w2}) / (r_2 - r_1)$ , где индексы 1 и 2 отмечают различные расстояния, на которых производятся измерения амплитуды звука.

Указанные выше методы были воплощены в компактное измерительное устройство, которое можно использовать как ручной погружаемый зонд для перемещения в морской воды от поверхности до заданной глубины (Буланов, Корсков, Попов, 2017). Регистрация амплитуды акустических импульсов на различных

частотах, включая амплитуды волн накачки и нелинейно генерируемых волн комбинационных частот, происходит при последовательных отражениях акустических волн между стенками измерительной ячейки. На рис. 1 представлена функциональная схема устройства для измерения нелинейного акустического параметра жидкости. Устройство состоит из погружаемой в море измерительной базы 5 длиной 70 см, на одном конце которой установлен акустический излучатель 6 диаметром 65 мм (частота накачки  $\sim 700$  кГц), а на другом конце – отражающая пластина. Излучатель 6 и датчик глубины 7 соединены кабелем с бортовым комплексом аппаратуры. Излучатель работает в импульсном режиме излучения, задаваемого цифровым генератором 2 под управлением компьютера 1 с приемом обратно отраженных импульсов. Сигналы от импульсов после нескольких циклов прохождения между противоположными стенками регистрируются с помощью коммутатора 4 и дальнейшей фильтрацией накачки 8 и разностной частоты 9, оцифровываются АЦП 12 и записываются на компьютере. Высокая частота накачки  $\sim 700$  кГц была выбрана, с одной стороны, исходя из условия минимизации вклада пузырьков и других микронеоднородностей в изменение эффективных акустических параметров морской среды на этих частотах, а с другой стороны – исходя из условий минимизации размеров и сохранения высокой мобильности зонда. При этом основная информационная составляющая могла быть измерена на относительно низких разностных частотах, на которых вклад микронеоднородностей оказывается достаточно большим. С борта судна, находящегося в дрейфе, устройство на кабеле опускалось на глубину до 100 метров в режиме непрерывной записи.

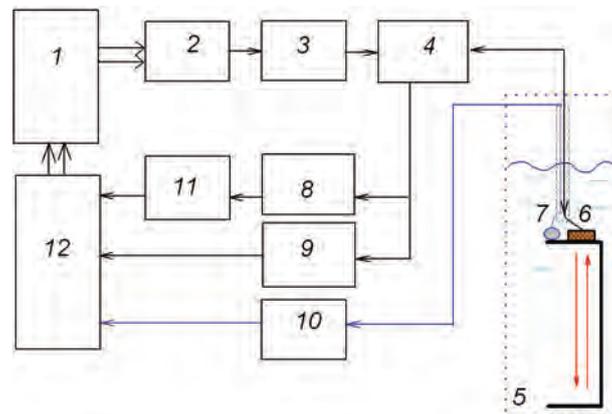


Рис. 1. Функциональная схема устройства для измерения акустического нелинейного параметра морской воды: 1 – компьютер; 2 – цифровой генератор частот накачки; 3 – усилитель мощности; 4 – коммутатор сигналов излучения-приема; 5 – измерительная база, 6 – излучатель; 7 – датчик глубины, 8, 9 – селективные усилители; 10 – усилитель сигналов с датчика глубины, 11 – детектор огибающей накачки; 12 – АЦП

Используя описанные выше методы, были проведены экспериментальные исследования нелинейного параметра в верхнем слое моря. На рис. 2 показана типичная зависимость параметра нелинейности от глубины в шельфовой зоне – в б. Витязь Японского моря, полученная с высоким разрешением в верхнем слое моря.

Как видно из рис. 2 в морской воде вблизи поверхности моря нелинейный параметр существенно превышает нелинейный параметр в чистой воде, равный 3.5.

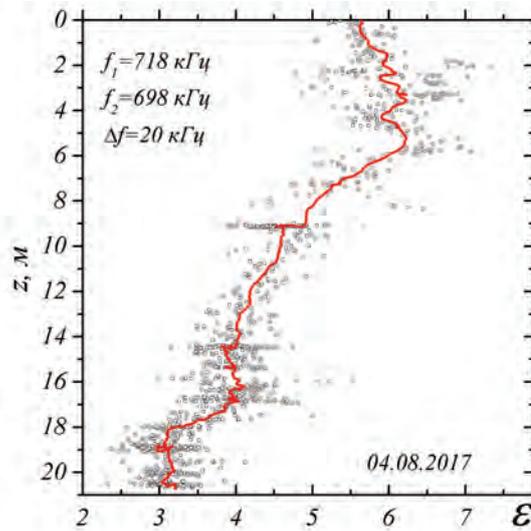


Рис. 2. Зависимость параметра нелинейности от глубины в б. Витязь Японского моря

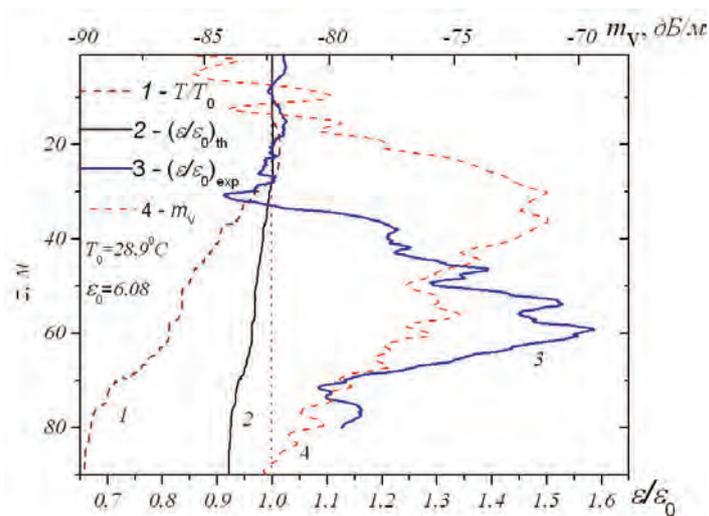


Рис. 3. Зависимости  $T(z)$ - 1;  $(\varepsilon(z)/\varepsilon)_{th}$ - 2;  $(\varepsilon(z)/\varepsilon)_{exp}$ -3, 4 -  $m_v(z)$

На рис. 3 представлены результаты измерений в Индийском океане – зависимости от глубины  $z$  нелинейного параметра  $\varepsilon(z)$ , температуры  $T(z)$  в виде  $T(z)/T_0$ , расчетные –  $(\varepsilon(z)/\varepsilon_0)_{th}$ , измеренные –  $(\varepsilon(z)/\varepsilon_0)_{exp}$  на частоте 15 кГц (накачка 700 кГц) и коэффициента рассеяния звука  $m_v(z)$ , индекс 0 указывает на то, что величины взяты на поверхности моря при  $z = 0$  ( $\varepsilon_0 = 6.08$ ). На рис. 4 представлена изменчивость  $m_v(z, t)$  на частоте 100 кГц в течение 2 часов. Из рис. 3 видно, что нелинейный параметр существенно изменяется с глубиной. В качестве оценки кривой 2 представлено распределение расчетного параметра  $(\varepsilon/\varepsilon_0)_{th}$ , которое получено на основе алгоритма расчета согласно формуле (1) с помощью гидрологических данных и фундаментальных свойств морской воды (включая данные Вильсона и Дель-Гроссо) (Fofonoff, Millard, 1983) для производной квадрата скорости звука

$(\partial c^2 / \partial P)_S$  с учетом  $c(T, S, P)$ , как функции температуры  $T$ , давления  $P$  и солёности  $S$  в соответствии с формулами

$$\varepsilon(T, S, P) = 1 + \rho c(T, S, P) \left[ \frac{dc(T, S, P)}{dp} + \frac{\alpha T}{\rho C_p} \frac{dc(T, S, P)}{dT} \right],$$

$$dc / dT = 4.587 - 0.107T + 7.81 \cdot 10^{-4} T^2 + 2.71 \cdot 10^{-5} TP - 7.19 \cdot 10^{-7} P^2 - 1.2 \cdot 10^{-2} (S - 35)$$

$$dc / dP = 0.15848 + 3.144 \cdot 10^{-5} P - 1.384 \cdot 10^{-11} P^3 + 1.354 \cdot 10^{-5} T^2 - 1.438 \cdot 10^{-6} TP,$$

где  $\rho$  – плотность,  $C_p$  – теплоемкость,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения.

Из сопоставления расчетных и экспериментальных кривых для  $(\varepsilon/\varepsilon_0)_{th}$  и  $(\varepsilon/\varepsilon_0)_{exp}$  видно, что результаты расходятся, что свидетельствует в пользу того, что нелинейность в морской воде в основном связана с наличием в ней микронеоднородностей различного происхождения. На рис. 3 и рис. 4 представлены измерения коэффициента рассеяния звука на частоте 100 кГц в течение 2 часов. Сопоставление кривых 3 и 4 для  $m_v(z)$  и  $\varepsilon(z)$  показывают, что изменение  $\varepsilon(z)$  расходится с  $m_v(z)$  – значительное изменение  $\varepsilon(z)$  наблюдается ниже горизонта максимума  $m_v(z)$  и совпадает с положением внутренней волны, располагающейся ниже ярко выраженного звукорассеивающего слоя, изображенного на рис. 4.

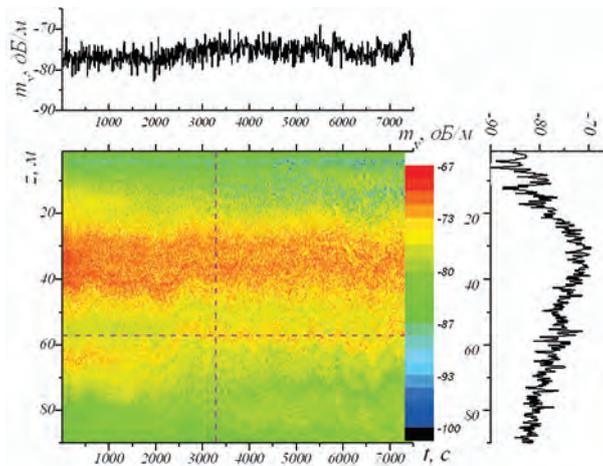


Рис. 4. Изменчивость  $m_v(z, t)$  на частоте 100 кГц

### Акустическая нелинейность, поглощение и рассеяние звука в верхнем слое моря

Как показано выше, в морской воде параметр нелинейности может значительно возрасти. Особенно сильно это проявляется для воды, содержащей газовые пузырьки, для которых  $\varepsilon$  будет зависеть от структуры среды, а также от динамических характеристик включений (Akulichev, Bulanov, 2015):

$$\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon} \approx \left( 1 + \frac{2\pi}{3} \frac{\beta'^2 (\gamma + 1)}{\beta^2 \varepsilon} \int_0^\infty g(R) R^3 dR \right) \left[ 1 + \frac{\beta'}{\beta} \int_0^\infty \frac{R^3 g(R) dR}{q(R, R_\omega)} \right]^{-2}, \quad (3)$$

где  $q(R, R_\omega) = 1 - (R/R_\omega)^2 (1 + i/Q_\omega)$ ,  $R_\omega = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho} / \omega$ ,  $Q_\omega$  – добротность пузырька,  $\gamma = 1,4$  – постоянная адиабаты,  $\beta$  и  $\beta'$  – адиабатическая сжимаемость

воды ( $\beta = 1/\rho c^2$ ) и газа в пузырьках ( $\beta' = \gamma / P_0$ ).

Пузырьки всегда присутствуют в приповерхностных слоях моря и известно, что пузырьки являются эффективными поглотителями энергии звуковых волн, распространяющихся в море (Deane, 1997; Andreas, Monahan, 2000; Vagle, McNeil, Steiner, 2010). Коэффициент поглощения звука можно рассчитать по приближенной формуле (Akulichev, Bulanov, 2015):

$$\alpha \approx \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \left[ 1 + \frac{4\pi}{3} \frac{\rho c^2}{\gamma P_0} \int_0^\infty \frac{g(R) dR}{q(R, R_\omega)} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Как видно из формул (3) и (4) для определения акустических характеристик верхнего слоя морской воды важен вид функции  $g(R)$  в возможно более широкой области изменения  $R$ . Данные по рассеянию звука на различных частотах в приповерхностном слое моря позволили выявить структуру распределения по размерам пузырьков – функцию  $g(R)$  (Акуличев, Буланов, 2012; Bulanov et al, 2015). Функция распределения обычно определяется как количество включений в единице объема  $dN$ , приходящихся на интервал их радиусов  $dR$ , так что концентрация пузырьков в единице объема равна  $N = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} g(R) dR$ , при этом  $g(R) = dN / dR$ .

Для исследования рассеяния звука была произведена постановка и калибровка акустической системы излучения–приема, включающей донную станцию и аппаратуру регистрации и анализа сигналов (Bulanov et al, 2015). Донная станция располагается на расстоянии около 100 м от берега на глубине около 12 м и включает в себя следующие излучатели: трехэлементный пьезокерамический излучатель с резонансными частотами 138, 216 и 519 кГц, параметрический двухэлементный излучатель с частотами 300 и 50 кГц, излучатели с резонансной частотой 170 кГц или 145 кГц, которые к тому же достаточно эффективно могли излучать на частоте  $\sim 67$  кГц. Береговой комплекс аппаратуры располагается в лабораторном помещении на берегу и связан с излучателями подводным кабелем. Таким образом, станция имеет достаточно широкий диапазон частот, перекрывающий наиболее интересную высокочастотную полосу, в пределах которой наблюдается высокая изменчивость спектра резонансных пузырьков (Deane, 1997; Vagle, McNeil, Steiner, 2010; Akulichev, Bulanov, 2011).

Особенности распределения коэффициента рассеяния звука, обусловленного изменением структуры пузырьков облаков, вовлекаемых ветровыми напряжениями и индуцированными течениями, представлены на рис. 5, типичным для мелкого моря при скорости ветра до 12 м/с. Из рис. 5 отчетливо видны вариации рассеяния звука с наиболее значительными повышениями уровня в моменты резкого усиления ветра, когда наблюдается вовлечение воздушных пузырьков в толщу морской воды до глубины 5-6 метров. Удобно ввести усредненный по толщине слоя коэффициент рассеяния звука  $\langle m_V(t) \rangle$ , который может изменяться во времени согласно формуле  $\langle m_V(t) \rangle = [1 / h_{\max}(t)] \int_0^{h_{\max}(t)} m_V(t, z) dz$ , где  $h_{\max}(t)$  – максимальная глубина, слабо изменяющаяся вследствие приливных и нагонных явлений. На рис. 5 на

верхнем графике для сравнения наряду с горизонтальным профилем  $m_V(t, z = 3)$  на глубине 3 м представлена функция  $\langle m_V(t) \rangle$ , отвечающая усреднению по всей совокупности данных  $m_V(t, z)$ , изображенных на среднем графике рис. 5. Видно, что средняя величина  $\langle m_V(t) \rangle$  существенно меньше  $m_V(t, z = 3)$ , измеренной в верхнем пузырьковом слое, при этом четко проявляется характерное изменение коэффициента рассеяния звука с периодом примерно в 2–3 часа.

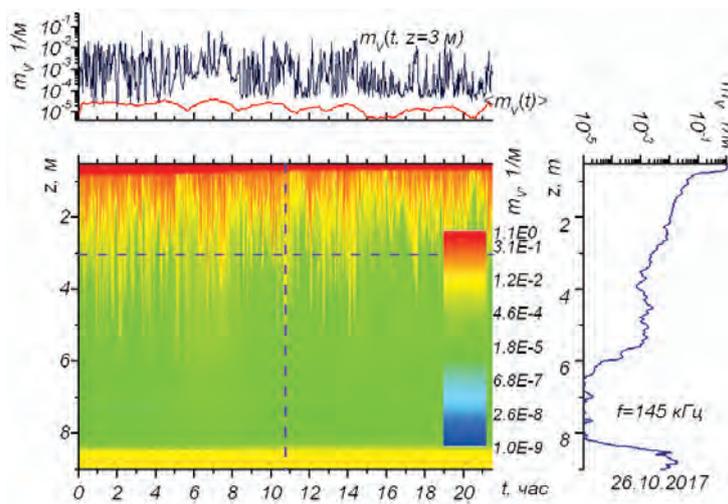


Рис. 5. Типичное распределение коэффициента рассеяния звука на частоте 145 кГц в верхнем слое моря, связанное с присутствием пузырьков

Функция распределения пузырьков по размерам  $g(R)$  может быть найдена по частотной зависимости коэффициента рассеяния звука  $m_V(\omega)$  в предположении, что основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки, радиус которых связан с частотой по формуле Миннерта (Vagle, McNeil, Steiner, 2010; Akulichev, Bulanov, 2011):

$$g(R(\omega)) = \frac{2\delta_\omega}{\pi R^3(\omega)} m_V(\omega), \quad R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho} / \omega, \quad (5)$$

где  $\delta_\omega = 1/Q_\omega$  – коэффициент резонансного затухания пузырьков на частоте  $\omega$ .

Полученные данные позволили получить функции распределения пузырьков по размерам, которые на рис. 6 показаны для пузырьков, резонансных на частоте 138 кГц на различных глубинах в различные временные периоды развития шторма. Кривые сверху и справа от рисунка соответствуют положению курсора на центральном рисунке. Из рис. 6 видно, что с усилением ветра происходит существенное вовлечение пузырьков в толщу моря.

Полученные экспериментальные результаты позволили аппроксимировать распределение пузырьков функцией  $g(R)$  вида (Акуличев, Буланов, 2012):

$$g(R) = A_g R^{-n} \exp\left[-n\left(\frac{R_p}{R} - 1\right) - \frac{R}{R_m}\right]. \quad (6)$$

В формуле (6) показатель степени  $n$  и критические размеры  $R_p$  (максимум  $g(R)$ ),  $R_m$  (спад  $g(R)$  при больших  $R$ ) являются естественными параметрами, которые

следуют из теории Фармера-Гаррета в инерционном интервале между размерами  $R_p, R_m$  (Garrett, Li, Farmer, 2000). Формулу (6) удобно использовать, чтобы в рамках гомогенной модели микроненоднородной среды (Akulichev, Bulanov, 2015) оценить акустические параметры приповерхностных слоев морской воды с пузырьками.

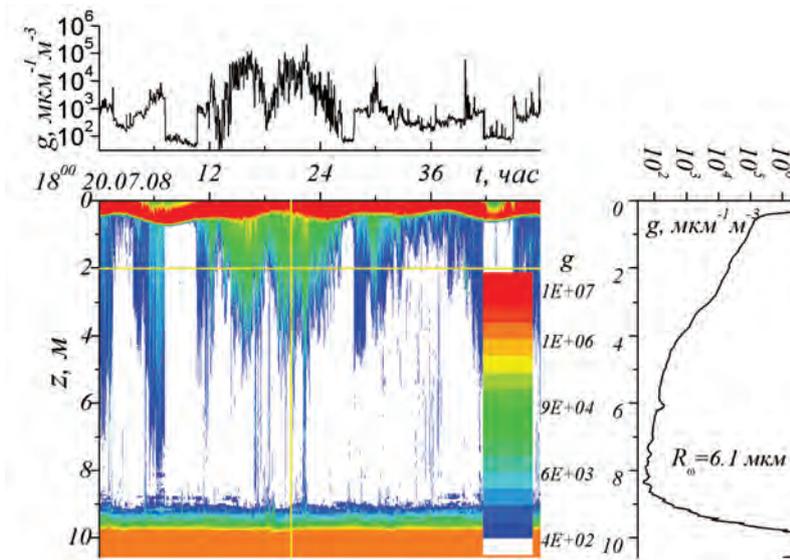


Рис. 6. Изменчивость пространственного распределения пузырьков, резонансных на частоте 138 кГц

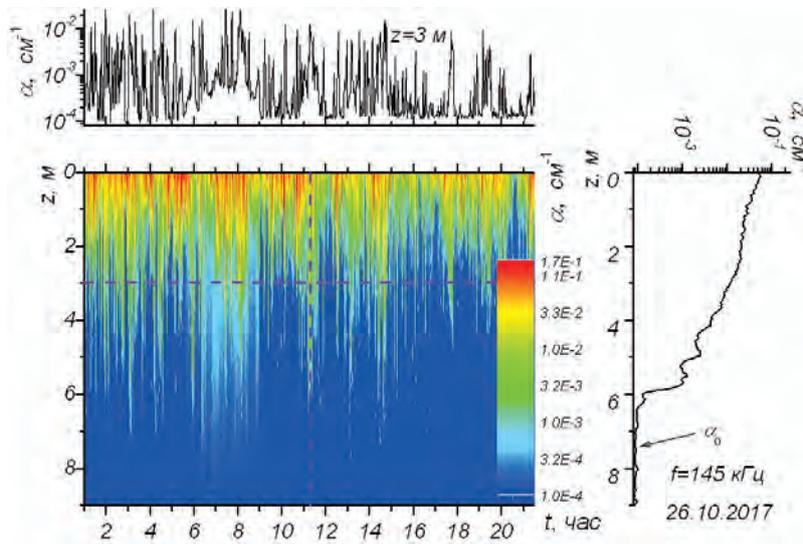


Рис. 7. Коэффициент поглощения звука при наличии пузырьков для частоты 145 кГц

На рис. 7 представлено изменение во времени коэффициента поглощения звука на частоте 145 кГц при наличии пузырьков. Кривые вверху и справа на рис. 7 – горизонтальный и вертикальный профили  $a(t, z)$ . Видно, что наблюдаются крайне высокие значения поглощения звука в воде с пузырьками, на порядки превышающие поглощение звука в морской воде без пузырьков.

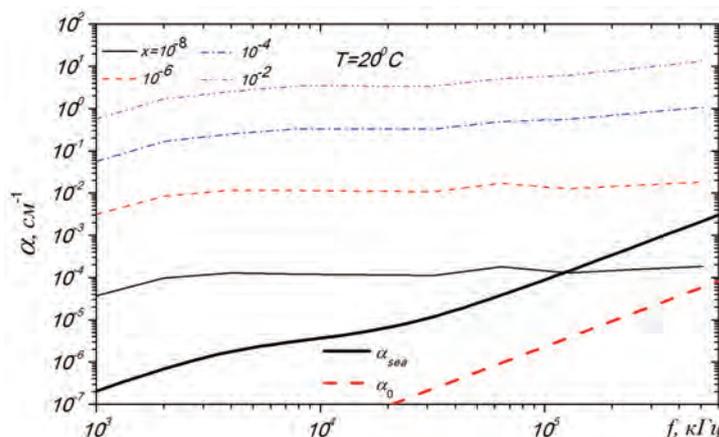


Рис. 8. Частотная зависимость коэффициента поглощения звука  $\alpha(f)$  в воде с полидисперсной смесью пузырьков при различных концентрациях

На рис. 8 представлена частотная зависимость коэффициента поглощения звука в воде с пузырьками при  $T=20^\circ\text{C}$ , вычисленная для полидисперсной смеси пузырьков различных концентраций  $x$  по формуле (6). Здесь также представлена частотная зависимость коэффициента поглощения звука в морской  $\alpha_{sea}(f)$  и пресной воде  $\alpha_0(f)$  при  $T=20^\circ\text{C}$  и солёности 35 промилле. Частотная зависимость коэффициента поглощения звука в пресной воде  $\alpha_0(f) \approx 2.3 \cdot 10^{-16} f^2$  (где  $a$  – в  $\text{см}^{-1}$ ,  $f$  – в Гц) и частотная зависимость коэффициента поглощения звука в морской воде согласно формуле Шулькина-Марша (Бреховских, Лысанов, 1982)].

Из рис. 8 видно, что в воде с пузырьками частотная зависимость  $a(f)$  выражена слабо. Такая слабая частотная зависимость связана с известным преобладающим механизмом резонансного затухания в пелене пузырьков с широкой функцией распределения  $g(R)$  пузырьков по размерам (Акуличев, Буланов, 2017). Следует обратить внимание, что на высоких частотах выше 1 МГц при концентрациях пузырьков меньше  $x \sim 10^{-8}$  возможно преобладание вклада в поглощение звука в чистой морской воде без пузырьков над вкладом от пузырьков с концентрацией ниже  $x_b \sim 10^{-8}$ . В пресной воде указанный порог  $x_b$  снижается еще на порядок. При типичных концентрациях пузырьков в приповерхностных слоях морской воды  $x \sim 10^{-6} - 10^{-5}$  в условиях развитого волнения затухание звука всецело будет определяться структурой пузырьковой пелены пузырьков.

Полученные выше результаты по концентрации пузырьков в приповерхностных слоях морской воды позволяют определить дополнительную акустическую нелинейность, привносимую распределенными в воде пузырьками, обладающими высокой нелинейностью. На рис. 9 представлены изменения во времени параметра акустической нелинейности морской воды  $\varepsilon(t, z)$  в приповерхностном слое пузырьков. Видно, что  $\varepsilon(t, z)$  изменяется в широких пределах при обрушениях поверхностных волн и сильном ветре. На больших глубинах  $\varepsilon(t, z)$  стремится к значениям для чистой воды.

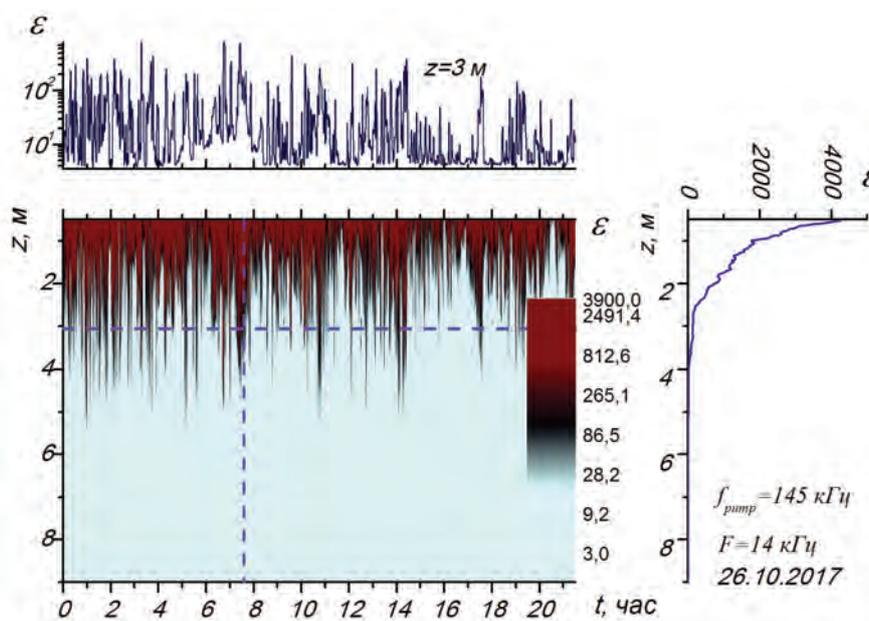


Рис. 9. Параметр акустической нелинейности морской воды  $\varepsilon(t, z)$  в приповерхностном слое пузырьков

Таким образом, в работе показано, что акустические характеристики существенно изменяются с глубиной и наблюдаемые аномалии поглощения и нелинейности обусловлены присутствием гетерогенных включений. Особенно сильно акустические параметры изменяются при обрушениях поверхностных волн и сильном ветре, приводящим к модуляциям акустических свойств в приповерхностном слое моря. Обсуждена возможность прогнозирования распределения акустической нелинейности и поглощения звука в океане и в мелком море на основе дистанционных данных по обратному рассеянию звука.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 17-02-00561а и программы «Дальний восток» ДВО РАН.

### Литература

- Акуличев В.А., Буланов В.А. О спектре пузырьков газа и возможностях акустической спектроскопии в приповерхностном слое океана // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446. № 2. С. 212–215.
- Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде: Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 414 с.
- Андреева И.Б. Рассеяние звука в океанических звукорассеивающих слоях // Акустика океана / ред. Бреховских Л.М., М.: Наука, 1974. С. 491–558.
- Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана: Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.
- Буланов В.А., Корсков И.В., Попов П.Н. Измерения нелинейного акустического параметра морской воды // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 3. С. 114–118.
- Есипов И.Б., Рыбак С.А., Серебряный А.Н. Нелинейная акустическая диагностика земных пород и океана // УФН. 2006. Т. 176. № 1. С. 102–108.
- Кузнецов В.П. Нелинейная акустика в океанологии. М.: Физматлит, 2010. 264 с.

- Andreas E.L., Monahan E.C.* The Role of Whitecap Bubbles in Air–Sea Heat and Moisture Exchange // *J. Phys. Oceanogr.* 2000. Vol. 30. No. 2. P. 433–441.
- Akulichev V.A., Bulanov V.A.* Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 130. No. 5. P. 3438–3449.
- Akulichev V.A., Bulanov V.A.* The bubble distribution and acoustic characteristics of the subsurface sea layer // *Proc. Mtgs. Acoust.* 2015. Vol. 24. 045003. 10 p. <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000163>.
- Bulanov V.A., Korskov I.V., Popov P.N., Storozhenko A.V.* Researches of sound scattering in the sea using the inverted echo sounder // *Proc. Mtgs. Acoust.* 2015. Vol. 24. 070013. 6 p. <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000140>.
- Deane G.B.* Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. Vol. 102. No. 5. P. 2671–2689.
- Fofonoff N.P., Millard R.C. Jr.* Algorithm for computation of fundamental properties of seawater, // UNESCO Technical papers in Marine Science. 1983. No. 44.
- Garrett C., Li M., Farmer D.* The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // *J. Phys. Ocean.* 2000. Vol. 30. No. 9. P. 2163–2171.
- Grelowska G., Kozaczka E.* Nonlinear Properties of the Gotland Deep – Baltic Sea // *Archives of Acoustics.* 2015. Vol. 40. No. 4. P. 595–600.
- Vagle S., McNeil C., and Steiner N.* Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific and estimates of their role in air-sea gas transfer of the weakly soluble gases nitrogen and oxygen // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. 16 p. DOI:10.1029/2009JC005990.

## ACOUSTIC NONLINEARITY OF THE UPPER OCEAN AND SHALLOW SEA AND FEATURES OF THE SCATTERING AND ABSORPTION OF SOUND

**V.A. Bulanov**

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS  
43, Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: [bulanov@poi.dvo.ru](mailto:bulanov@poi.dvo.ru)*

Submitted 01.06.2018, accepted 27.08.2018

The marine environment is characterized by existence of various small-scale inhomogeneities, which exist near the sea surface and in the water column: gas bubbles, different suspended matter, plankton of different sizes, microturbulence, etc. All of these reasons inhomogeneities add your contribution to the acoustic characteristics of the marine environment, including nonlinear characteristics which are important for hydroacoustics. Despite the importance of the nonlinearity parameter for the marine environment, information on measurement of it at sea is very scarce. In the paper features of linear and nonlinear acoustic characteristics of sea water containing small-scale heterogeneities are discussed. The results of studies of acoustic nonlinearity of sea water and the absorption of sound at different depths in situ are presented. A comparison are obtained for the local acoustic parameters and for coefficients of backscattering of sound in the upper ocean to a depth of 100 meters. It is shown that the acoustic characteristics change significantly with depth and the observed anomalies in absorption and nonlinearity due to the presence of heterogeneous inclusions. It is shown that peculiarities of the spatial structure of the scattering coefficient of sound due to changes in the structure of the bubble clouds entrained wind stress and induced currents at a wind speed of 12 m/s. It is discussed the relationship of scattering and absorption of sound with the

acoustic nonlinearity of sea water. It is shown the ability to predict the distribution of acoustic nonlinearity and sound absorption in the ocean and in the shallow sea on the basis of remote sensing data for backscattering of sound.

**Keywords:** acoustic nonlinearity, scattering, absorption of sound, sea water, the upper layer of the ocean, bubbles, shallow sea

### Reference

- Akulichev V.A. and Bulanov V.A.* Spectrum of gas bubbles and possibilities of acoustic spectroscopy in the surface layer of the ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2012, Vol. 446, Part 1. pp. 1113–1116, doi: 10.1134/S1028334X12090097.
- Akulichev V.A. and Bulanov V.A.* *Akusticheskie issledovaniya melkomasshtabnykh neodnorodnostei v morskoi srede* (Acoustic study of small-scale heterogeneities in the marine environment), Vladivostok: TOI DVO RAN, 2017, 414 p.
- Andreeva I.B.* Rasseyanie zvuka v okeanicheskikh zvukorasseivayushchikh sloyakh (The scattering of sound in the ocean sound scatter layers), *Akustika okeana*, red. Brekhovskikh L.M., Moscow: Nauka, 1974, pp. 491–558.
- Andreas E.L. and Monahan E.C.* The role of whitecap bubbles in air–sea heat and moisture exchange. *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, Vol. 30, No. 2, pp. 433–441.
- Akulichev V.A. and Bulanov V.A.* Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011, Vol. 130, No. 5, pp. 3438–3449.
- Akulichev V.A. and Bulanov V.A.* The bubble distribution and acoustic characteristics of the subsurface sea layer. *Proc. Mtgs. Acoust.*, 2015, Vol. 24, 045003, 10 p., <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000163>.
- Brekhovskikh L.M. and Lysanov Yu.P.* Fundamentals of ocean acoustics: Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1991, 270 p., doi: 10.1007/978-3-662-07328-5.
- Bulanov V.A., Korskov I.V., and Popov P.N.* Measurements of the nonlinear acoustic parameter of sea water via a device using reflected pulses. *Instruments and Experimental Techniques*. 2017, Vol. 60, No. 3, pp. 414–417, doi: 10.1134/S1028334X12090097.
- Bulanov V.A., Korskov I.V., Popov P.N., and Storozhenko A.V.* Researches of sound scattering in the sea using the inverted echo sounder. *Proc. Mtgs. Acoust.* 2015, Vol. 24, 070013, 6 p., <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000140>.
- Deane G.B.* Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1997, Vol. 102, No. 5, pp. 2671–2689.
- Esipov I.B., Rybak S.A., and Serebryanyi A.N.* Nonlinear acoustic diagnostics of the ocean and rock. *Phys.-Usp.*, 2006, Vol. 49, No. 1, pp. 94–98, doi: 10.1070/PU2006v049n01ABEH005878.
- Fofonoff N.P. and Millard R.C. Jr.* Algorithm for computation of fundamental properties of seawater. *UNESCO Technical papers in Marine Science*, 1983, No. 44.
- Garrett C., Li M., and Farmer D.* The connection between bubble size spectra and energy dissipation rates in the upper ocean. *J. Phys. Ocean.* 2000, Vol. 30, No. 9, pp. 2163–2171.
- Grelowska G. and Kozaczka E.* Nonlinear Properties of the Gotland Deep – Baltic Sea. *Archives of Acoustics*, 2015, Vol. 40, No. 4, pp. 595–600.
- Kuznetsov V.P.* *Nelineinaya akustika v okeanologii* (Nonlinear acoustics in oceanology), Moscow: Fizmatlit, 2010, 264 p.
- Vagle S., McNeil C., and Steiner N.* Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific and estimates of their role in air–sea gas transfer of the weakly soluble gases nitrogen and oxygen. *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, C12054, 16 p., doi:10.1029/2009JC005990.

## НИЗКОЧАСТОТНОЕ ПОЛЕ ШУМОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ

**Б.И. Клячин**

*Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, 127051,  
ул. Сретенка, 29 тел. 8(909)640-66-09, e-mail: klboris@rambler.ru*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.09.2018

Широко известны многочисленные исключительные особенности озера Байкал. В данной работе рассматривается еще одно уникальное свойство озера: собственное низкочастотное шумовое поле Байкала сильно похоже на низкочастотное шумовое поле глубокого океана. Рассчитывается глубинная зависимость шума в озере летом. Производится подробное сравнение основных характеристик низкочастотного шума в глубоком океане и Байкале.

**Ключевые слова:** Байкал, низкочастотное поле шумов, глубинная зависимость шумов

### Вступление

Известно, что шумовое поле глубокого океана обладает некими характерными параметрами. Это поле собирается с большой акватории благодаря многократным отражениям от поверхности океана. При этом преобладает шум в так называемых водных лучах, отраженных от поверхности и не дошедших до дна. Размер области, где собирается шум, может составлять сотни километров. В последнее время возрос интерес к исследованию распространения звука в озерах. В основном озера используются как более доступный, чем океан, объект для изучения распространения звука. И процессы распространения звука в разных озерах могут быть похожи на соответствующие законы в океане.

Другое дело низкочастотные шумы. Размеры озер, даже самых больших, сопоставимы или меньше размеров области, с которой собираются низкочастотные шумы глубокого океана. Поэтому в озерах, как правило, нет достаточно протяженной области, где шумовое поле будет однородно по горизонтали. Везде, в любой точке озера, будут «краевые эффекты» – форма берегов и расстояние от этой точки до берегов. Возможно, конечно, найти относительно мелкое озеро, где будет горизонтально однородное низкочастотное шумовое поле, но оно совсем не такое, как в глубоком океане. По-видимому, единственным исключением является Байкал. (Озеро Танганьика похоже на озеро Байкал по форме и глубине. Но там, ввиду жаркого климата, скорость звука у поверхности весьма велика, не меньше, чем скорость звука у дна озера. В результате, в Танганьике нет водных лучей, которые не испытывают отражения от дна, и нет характерного для океана низкочастотного шумового поля).

### Методы исследования

В Байкале проводились измерения высокочастотных акустических шумов при работах, связанных с нейтринным телескопом (Айнутдинов, 2006).

Определим точнее частоты шумовых полей, которые исследуются в данной работе. Мы будем применять лучевую теорию (точнее теорию переноса излучения). Это можно делать, когда на толщине волновода укладывается десять и более длин волн. Для океана (глубина 6 км) это соответствует частоте в единицы герц и выше. Для озера (1.6 км) – первые десятки герц и выше.

С другой стороны, пренебрежение полем донных лучей (эти лучи испытывают донные отражения) связано с малым затуханием звука на циклах водных лучей. Это ограничивает частоту исследуемых здесь полей сверху. Для океана – это сотни герц и ниже, для озера (короткие лучи) – первые килогерцы и ниже.

Для расчета шумового поля в озере Байкал воспользуемся работой (Клячин, 2009), где посчитано поле шумов в разломе дна в океане. Байкал представляет собой разлом земной коры, заполненный пресной водой. Рассчитать шумовое поле в этом озере даже проще, чем в разломе дна в океане. Действительно, при анализе шумового поля в разломе дна в океане и над ним необходимо рассчитать шум и в слоистой части океана, и в разломе. А здесь нам нужно исследовать только шум в разломе (озере).

Более подробно метод расчета изложен в работе (Курьянов, Клячин, 1981). В работе (Клячин, 2017) приведены некоторые примеры теоретического изучения похожих объектов в океане.

### Математическая модель шумового поля

Отметим, что, как и в океаническом разломе, в Байкале шум будет накапливаться вдоль самого разлома. В перпендикулярном направлении шум накапливаться не будет. Байкал состоит из трех котловин с горизонтальным размером около 100 км каждая, вытянутых вдоль разлома. Максимальная глубина озера чуть больше, чем 1.5 км. Это существенно меньше, чем в океане. Но при этом выполняется условие: скорость звука у поверхности меньше, чем у дна (Макаров, Ченский, 2009; Юрин, 2009; Толмачева, 2012; Овчинникова, 2008). Длина цикла водного луча будет 2–3 км, что существенно меньше, чем в океане, где глубина обычно более 5 км. И длина цикла водного луча океана составит 20–30 км. Следовательно, размер области, где шумовое поле станет самосогласованным, у озера существенно меньше, чем в океане. В каждой из трех котловин Байкала укладывается значительно больше, чем десять циклов лучей. (Что достаточно для наличия установившегося шумового поля, однородного по горизонтали). Итак, размер области, где среда и источники шума должны быть однородны по горизонтали, – более 30 км для озера и более 300–500 км для океана.

Опишем пучок водных лучей озера более детально. Самый короткий (первый) водный луч является касательным к поверхности озера. И этот луч заворачивает

на критической глубине, где скорость звука становится равной скорости звука у поверхности. Самый длинный (второй) водный луч выходит с поверхности и заворачивает на дне. Все остальные водные лучи оказываются между этими двумя лучами. Этот пучок весьма узок.

Основным фактором, влияющим на скорость звука в озере, является температура (Макаров, Ченский, 2009; Юрин, 2009). Распределение скорости звука по глубине стабильно зимой и летом и меняется весной и осенью. Мы будем рассматривать шумовое поле в стабильный период (летом и зимой). При этом характерное для Байкала распределение скорости звука с глубиной летом отличается очень высоким положением оси подводного звукового канала – горизонтом минимума скорости звука. Глубина этой оси – всего 100 м. Данное обстоятельство приводит к тому, что критическая глубина (где скорость звука равна скорости звука у поверхности) так же находится очень высоко (750 м). Отсюда следует, что пучок водных лучей будет формироваться на промежуточных глубинах – более 750 м. А это значительная часть акватории, в особенности в южной и центральной котловинах. Следовательно, детали рельефа, отраженные точными картами, мало скажутся на представленном результате – шуме озера в центральных районах южной и центральной котловин.

Мы используем теорию переноса излучения (Исимару, 1981; Курьянов, Клячин, 1984). Основной величиной является плотность потока мощности шума в единичный телесный угол и на единичную площадку –  $I$ . В слоистой среде вдоль луча выполняется соотношение:  $Ic^2 = const$ , где  $c$  – скорость звука. Известно, что затухание низкочастотного звука мало. Пренебрежем затуханием шума на одном цикле луча. (Это не означает отсутствие затухания шума на многих циклах луча).

Расчет мог бы быть выполнен и по-другому. Можно воспользоваться классической лучевой теорией и учесть все многократные отражения шумового поля от всех источников, находящихся на поверхности водоема. Результат, естественно, будет такой же (Фурдуев, 1974).

Рассчитаем график распределения интенсивности шумового поля от глубины в центральной части котловин озера, где выполняется условие горизонтальной однородности среды. Уже отмечалось, горизонтальная однородность среды приводит к горизонтальной однородности шумового поля. Следовательно, лучевая интенсивность в любой точке поверхности во всех лучах узкого водного пучка будет одна и та же –  $I_n$  (это не интенсивность реального излучения на поверхности озера. Мы можем относительно легко рассчитать связь между этими двумя интенсивностями, проследив лишь один полный цикл шумового луча (Клячин, 2009; Курьянов, Клячин, 1981)). Но здесь такое исследование не требуется.

Итак, используя  $I_n$ , получим лучевую интенсивность шума в любом водном луче на глубине  $z$ :  $I_z = I_n(c_n^2/c_z^2)$ , где  $c_n$  – скорость звука у поверхности,  $c_z$  – скорость звука на глубине  $z$ .

Чтобы перейти к итоговой интенсивности (энергии) шума в точке  $z$ , нужно просуммировать лучевые интенсивности по всему телесному углу, который заполнен водными лучами. Кроме того, нужно ввести множитель  $1/c_z$  (чем меньше  $c_z$ ,

тем больше энергии «застрянет» в данной точке (Клячин, 2009; Курьянов, Клячин, 1981)).

Мы считаем  $I_n$  одинаковыми для всех водных лучей, тогда  $I_z$  будет также одинакова для всех этих лучей. Следовательно, зависимость интенсивности (энергии) шума от глубины определяется, почти исключительно, изменением телесных углов прихода водных лучей на разные глубины. Эта глубинная зависимость определяется формой пучка водных лучей.

Согласно закону Снелиуса, угол первого граничного водного луча на горизонте  $z - \theta_z^I = \arcsin(c_z/c_n)$  – (луч касательный к поверхности). Второй граничный луч (касательный ко дну) имеет на горизонте  $z$  угол  $\theta_z^{II} = \arcsin(c_z/c_0)$ , где  $c$  – скорость звука у дна озера.

Итак, интенсивность шума на глубине  $z$  будет пропорциональна разности между этими углами:

$$E(z) = K [\arcsin(c_z/c_n) - \arcsin(c_z/c_0)] / c_z^3, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности. В него входят в качестве множителей: лучевая интенсивность шума на поверхности озера  $I_n$ ,  $c_n^2$ , затухание звука.

Кроме того, нужно учесть, что не все  $2\pi$  горизонтальных направлений будут наполнены шумом. Шумом будут наполнены только те горизонтальные направления, где луч успеет проделать десять и более полных циклов водного луча прежде, чем выйдет за границы разлома. Так мы учитываем то, что имеем дело с разломом. Это обстоятельство приведет к наличию еще одного множителя  $< 1$  в коэффициенте  $K$ .

Поскольку мы будем в дальнейшем представлять результаты расчетов в децибелах, коэффициент пропорциональности  $K$  не повлияет на окончательный результат.

Важно отметить, что для глубин больших критической глубины  $z \geq z_0$  ( $z_0$  – критическая глубина, где скорость звука равна скорости звука на поверхности), формула (1) будет выглядеть несколько иначе:

$$E(z) = K [\pi/2 - \arcsin(c_z/c_0)] / c_z^3, \quad (2)$$

Поскольку на данных глубинах угол первого граничного луча водных лучей всегда равен  $\pi/2$ .

Из этих формул видно, что для конкретного распределения скорости звука по глубине  $E(Z)$  зависит только от  $C(Z)$ . Следовательно, как и в океане (Клячин, 2009; Курьянов, Клячин, 1981), выполняется закон «сопряженных глубин»: интенсивность шума одинакова на глубинах с равной скоростью звука. (В частности на критической глубине интенсивность шума равна интенсивности шума на поверхности).

## Поле шумов летом

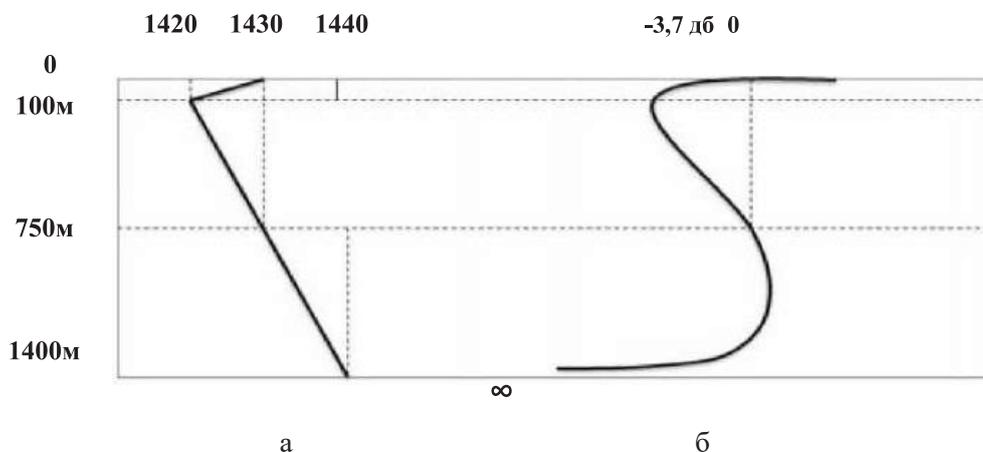


Рис. 1.

На рисунке 1 приведены результаты расчетов по этим формулам. На рисунке 1а представлено летнее распределение скорости звука с глубиной в Байкале. Это распределение очень похоже на океаническое. Отличия: относительно малая глубина (около 1.5 км). Ось подводного канала и критическая глубина на небольших глубинах – 100 м и 750 м соответственно. Скорость звука на поверхности – 1430 м/с, на оси канала 1420 м/с, у дна – 1440 м/с. Скорость звука везде существенно меньше океанической (пресная вода).

На рисунке 1б приведена летняя глубинная зависимость интенсивности шума. Минимум на оси канала (-3.7 дБ), максимум чуть ниже критической глубины. При приближении ко дну интенсивность шума убывает до бесконечности (в децибелах).

Такие особенности глубинной зависимости связаны, как это уже упоминалось, с формой пучка водных лучей.

Минимум шума на оси канала связан с тем, что здесь углы водных лучей ближе всего к вертикали. (Здесь энергия шума как бы быстрее всего «покидает» эти горизонты).

Максимум шума ниже критической глубины. Это вызвано тем, что углы водных лучей на данной глубине ближе всего к горизонтали. (Водные лучи как бы больше «находятся» на этих горизонтах).

Интенсивность шума убывает ко дну, так как, чем ближе ко дну, тем меньше водных лучей туда доходит.

Это очень похоже на океаническую глубинную зависимость интенсивности шума (Клячин, 2009; Курьянов, Клячин, 1981). Отличия:

1. Разброс значений скорости звука в озере меньше, чем в океане. И разброс значений интенсивности шума в озере также меньше, чем в океане. Так ослабление шума на оси подводного канала в озере не такое большое, как соответствующее ослабление в океане.

2. Вертикальный градиент скорости звука у озера, напротив, больше, чем в океане. И вертикальный градиент интенсивности шума у озера больше.

3. Область ниже критической глубины занимает существенно больший объем озера (1/2), чем аналогичная область в океане (1/5).

Направленность шума до критической глубины (не изображена на рисунке) – два узких лепестка в симметричных направлениях под значительным углом с горизонталью. Ниже критической глубины направленность представляет собой один лепесток в горизонтальном направлении.

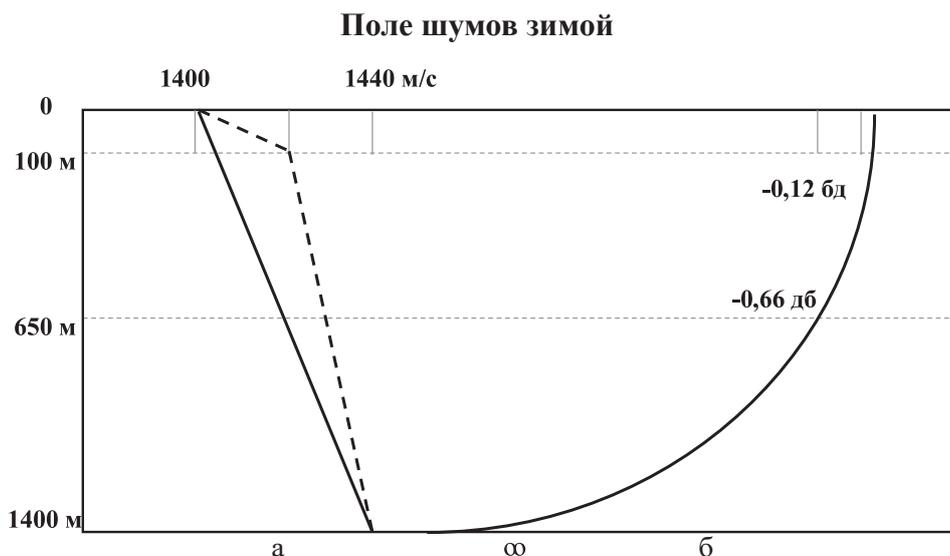


Рис. 2.

Для условий зимней гидрологии (рис. 2а) будем считать, что скорость звука линейно возрастает от 1400 м/с на поверхности до 1440 м/с у дна. В реальности там близкое к указанному, но билинейное распределение. При этом для расчета используется только вторая формула. Зимой Байкал покрыт льдом. Механизмы излучения шума на поверхности озера другие, чем летом. Но пучок усиливающихся водных лучей так же узок. Особенности генерации шума на представленный результат не повлияют. Интенсивность шума падает с глубиной при приближении ко дну до бесконечности. В этом случае все озеро как бы находится ниже критической глубины. Все особенности соответствующей глубинной зависимости уже обсуждались в предыдущем случае.

### Заключение

Данная работа посвящена самым общим особенностям низкочастотного шумового поля озера. Следующими шагами в этом направлении исследований скорее всего будет:

1. Учет сложного рельефа дна, особенно прибрежной части Байкала.
2. Исследование шумового поля в период между сезонами, при более сложных, чем в этой работе, гидрологических условиях.

### 3. Изучение шума впадающих в озеро рек.

Для этого потребуются детальные гидрологические данные (Шерстянкин, Куимова, 1992; Шерстянкин, Куимова, Потемкин 1998). Так же нужны и подробные сведения о рельефе дна озера. Они имеют современное и наглядное представление (Batist, Canals, Sherstyankin, Alekseev 2002).

Итак, низкочастотное шумовое поле озера Байкал в разные сезоны похоже на поле шумов глубокого океана, хотя и обладает некоторой спецификой. По-видимому, Байкал – единственное озеро с таким низкочастотным шумом.

## Литература

- Айнутдинов В.М. и др.* Высокочастотные акустические шумы озера Байкал // Акустический журнал. 2006. Т. 52. № 5. С. 581–591.
- Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Москва: Мир, 1981. Т. 1. 280 с.
- Клячин Б.И.* Сильные горизонтальные неоднородности шумовых полей в океане // Ученые записки физического факультета Московского Университета. № 5: октябрь. 2017. С. 1–3.
- Клячин Б.И.* Эффект усиления собственного шума океана над разломом дна // Доклады XII школы семинара Акад. им. Л.М. Бреховских М.: Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова, 2009. С. 268–271.
- Курьянов Б.Ф., Клячин Б.И.* К теории глубинной зависимости низкочастотных шумов океана // Доклады АН СССР. 1981. Т. 259. № 6. С. 1483–1488.
- Курьянов Б.Ф., Клячин Б.И.* Применение теории переноса излучения к задачам распространения шумов океана // Проблемы акустики океана: Сборник / под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреева. М.: Наука, 1984. С. 16–30.
- Макаров М.М., Ченский А.Г.* Изучение дальнего распространения звука на озере Байкал: оборудование, экспериментальные данные // Доклады XII школы семинара им. Акад. Бреховских Л.М. / Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: ГЕОС, 2009. С. 119–122.
- Овчинникова Н.С.* Северный Байкал // ГП 475 Военно-картографическая ф-ка. Республика Бурятия: 2008. [Карты].
- Озеро Байкал / под ред. Толмачевой // Иркутск: ВостСиб АГП, 2012. [Карты].
- Озеро Байкал / под ред. Ю.М. Юрина // Иркутск: ВостСиб АГП, 2009. [Карты].
- Фурдуев А.В.* Шумы океана // В кн.: Акустика океана / ред. Л.М. Бреховских. Москва: Наука, 1974. С. 617–688.
- Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н.* Основные черты поля скорости звука и подводный звуковой канал в открытом Байкале // Доклады РАН. 1992. Т. 324. № 1. С. 187–190.
- Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н., Потемкин В.Л.* Особенности поля скорости звука глубокого пресного водоема на примере озера Байкал // Сборник трудов школы-семинара Акад. им. Л.М. Бреховских Акустика океана / Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва: ГЕОС, 1998. С. 348–351.
- De Batist M., Canals M., Sherstyankin P., Alekseev S. & the INTAS project 99–1669 team.* A new bathymetric map of lake Baikal. 2002. <http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm>.

## LOW FREQUENCY FIELD NOISE OF LAKE BAIKAL

**B. I. Klyachin**

*Moscow State Psychological and Pedagogical University Moscow,  
127051, st. Sretenka, 29  
tel. 8 (909) 640-66-09, e-mail: klboris@rambler.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.09.2018

The unique characteristics of Baikal Lake are widely known. This paper is devoted to one more unique feature of the lake: the low-frequency noise field that is very similar to the low-frequency noise field of the deep ocean. The calculation of deep lake noise is conducted for the summer. A thorough comparison of the main characteristics of low-frequencies in the deep ocean and in the Baikal Lake is also presented.

**Keywords:** Baikal Lake, low frequency noise field, depth dependence of the acoustic noise

### References

- Ajnutdinov V.M., et al.* Visokochastotnye akusticheskie shumy ozera Bajkal: High-frequency acoustic noise of lake Baikal. *Acoustic journal*, 2006, Vol. 5, No. 5, pp. 581–591.
- De Batist M., Canals M., Sherstyankin P., Alekseev S., & the INTAS project 99–1669 team.* A new bathymetric map of lake Baikal, 2002, <http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm>.
- Furduev A.V.* Shumy okeana: In the book *Akustika okeana: Ocean acoustics*, Add. by L.M. Brekhovskih, Moscow: Nauka, 1974, pp. 617–688.
- Isimaru A.* Rasprostranenie i rassejanie voln v sluchajno-neodnorodnyh sredah: Propagation and scattering of waves in randomly inhomogeneous media, Moscow: Mir, 1981, Vol. 1, pp. 280.
- Klyachin B.I.* Jeffekt usilenija sobstvennogo shuma okeana nad razlomom dna: The effect of enhancing the ocean's own noise above the bottom break. *Doklady XII shkoly seminaru (Reports of the XII seminar school) im. Akademika L.M. Brehovskih*, Moskva: Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, 2009, pp. 268–271.
- Klyachin B.I.* Sil'nye gorizontal'nye neodnorodnosti shumovyh polej v okeane. (Strong horizontal inhomogeneities of noise fields in the ocean). *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo Universiteta: Scientific notes of the Physics Department of Moscow University*, No. 5, October 2017, pp. 1–3.
- Kur'janov B.F. and Kljachin B.I.* Primenenie teorii perenosa izluchenija k zadacham rasprostraneniya шумов океана: Application of the theory of radiation transfer to the problems of propagation of ocean noise. *Sbornik Problemy akustiki okeana (Collection Problems of ocean acoustics)*, Edd. by L.M. Brehovskih and I.B. Andreeva, Moscow: Nauka, 1984, pp.16–30.
- Kur'janov B.F. and Klyachin B.I.* K teorii glubinoj zavisimosti nizkochastotnyh шумов океана: To the theory of the deep dependence of low-frequency noise of the ocean. *Doklady AN SSSR, Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1981, Vol. 259, No. 6, pp. 1483–1488.
- Makarov M.M. and Chenskiy A.G.* Izuchenie dal'nego rasprostraneniya zvuka na ozere Bajkal: oborudovanie, jeksperimental'nye dannye: Study of long-range sound propagation on Lake Baikal: equipment, experimental data. *Doklady XII shkoly seminaru (Reports of the*

- XII seminar school) im. Akademika L.M. Brehovskih, Moskva: Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, 2009, pp. 119–122.
- Ozero Bajkal. Karty: Lake Baikal. Maps: red. Y.M. Yurin. Irkutsk: VostSib AGP, 2009.
- Ozero Bajkal. Karty: Lake Baikal. Maps: red. Tolmacheva. Irkutsk: VostSib AGP, 2012.
- Ovchinnikova N.S.* Severnyj Bajkal. Karty: Northern Baikal. Maps. GP 475 Voенno-kartograficheskaya f-ka, Republic of Buryatia, 2008.
- Sherstyankin P.P. and Kuimova L.N.* Osnovnie cherti polya skorosti zvuka i podvodnii zvukovoi kanal v otkritom Baikale: The main features of the sound speed field and underwater sound channel in the open lake Baikal. *Doklady RAN*, 1992, Vol. 324, No. 1, pp. 187–190.
- Sherstyankin P.P., Kuimova L.N., and Potemkin V.L.* Osobennosti polya skorosti zvuka glubokogo presnogo vodoema na primere ozera Baikal: Features of the sound velocity field of a deep freshwater reservoir on the example of lake Baikal. Sbornik trudov shkoli-seminara Akad. L.M. Brehovskih, Akustika okeana, Institut okeanologii im. P.P. Shirshova, Moskva: GEOS, 1998, pp. 348–351.

## **ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ СРАБАТЫВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

**Ю.С. Крюков, Е.О. Черепанов**

*ФГУП «НИИ прикладной акустики», Дубна, 141981, Россия  
e-mail: [kryukov@niira.ru](mailto:kryukov@niira.ru), [evgeny.cherepanov@niira.ru](mailto:evgeny.cherepanov@niira.ru)*

Статья поступила в редакцию 05.05.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Рассмотрена задача моделирования и дистанционной оценки координат срабатывания подводного импульсного источника на основе определения моментов времени прихода сигналов на гидрофоны радиобуев в пространственно-разнесенных точках с известными координатами. Приведены формулы расчета координат подводных импульсных источников для аналитического способа и метода минимизации функционала. Описаны алгоритмы встроенного программного обеспечения радиобуев для автоматической обработки гидроакустических сигналов и передачи данных на пульт управления. Представлены реализованные в программном обеспечении пульта управления алгоритмы автоматизированной оценки координат срабатывания одиночных и групповых подводных импульсных источников с учетом требований работы в реальном масштабе времени. Дано описание программных средств и алгоритмов моделирования распространения сигнала от импульсного источника с целью определения параметров и допустимой дальности расположения измерительного оборудования в ходе подготовки эксперимента. Рассмотрены вопросы оптимального размещения точек приема для снижения влияния погрешностей определения собственных координат радиобуев на результаты расчетов. Приведены результаты гидрологических измерений и натурных экспериментов по оценке координат и глубин срабатывания подводных импульсных источников в условиях акваторий Ладожского озера и Черного моря.

**Ключевые слова:** программные средства, обработка гидроакустических сигналов, моделирование, дистанционная оценка координат, подводный импульсный источник, результаты натурных экспериментов

### **Введение**

Настоящая работа является продолжением исследований по дистанционной оценке координат срабатывания подводных импульсных источников, выполненных авторами в работах (Крюков Ю.С. и др., 2014; Костенко К. В., Крюков Ю.С., 2016).

В ряде прикладных задач, связанных с позиционированием и навигацией подводных объектов, а также при натурных испытаниях образцов подводных взрывных источников на водной акватории, вопросы дистанционной оценки координат в реальном масштабе времени наблюдения сигналов являются весьма актуальными.

### **Методы и методология исследования**

Для оценки координат источников применен акустический метод триангуляции с использованием относительных задержек сигналов, зарегистрированных

датчиками в пространственно-разнесенных точках приема с известными координатами (Крюков Ю.С. и др., 2014; Крюков Ю.С., 2010).

Для выбранных четырех точек приема сигналов с известными координатами:  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ ,  $(x_4, y_4)$  задача оценки координат срабатывания подводного источника  $(x_s, y_s)$  и определения времени распространения сигнала  $t_1$  до точки приема 1 сводится к решению матричного уравнения:

$$A \cdot X = D, \text{ где } A = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ t_1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a_{21} = x_2 - x_1 \quad b_{21} = y_2 - y_1 \quad c_{21} = \Delta t_{21} c_0^2 \quad a_{31} = x_3 - x_1 \quad b_{31} = y_3 - y_1 \quad c_{31} = \Delta t_{31} c_0^2$$

$$a_{41} = x_4 - x_1 \quad b_{41} = y_4 - y_1 \quad c_{41} = \Delta t_{41} c_0^2$$

$$d_{21} = \frac{[x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{21}^2]}{2}, \quad d_{31} = \frac{[x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{31}^2]}{2}, \quad d_{41} = \frac{[x_4^2 - x_1^2 + y_4^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{41}^2]}{2},$$

$\Delta t_{21}$ ;  $\Delta t_{31}$ ;  $\Delta t_{41}$  – задержки времени прихода сигналов в точки приема сигналов 2, 3, 4 соответственно относительно точки приема 1;  $c_0$  – среднее значение скорости звука в среде для глубин расположения источника и приемника сигналов.

В ряде случаев для уточнения результатов оценок координат применялся метод минимизации функционала, составленного из полученных относительных задержек времени прихода сигналов. Вычисление координат источника  $x_s, y_s$  выполняется путем минимизации функции следующего вида:

$$f(x_s, y_s) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \left( t_i - t_j - \frac{1}{c_0} \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} + \frac{1}{c_0} \sqrt{(x_j - x_s)^2 + (y_j - y_s)^2} \right)^2, \quad (2)$$

где  $x_i, y_i, x_j, y_j$  координаты датчиков  $i$  и  $j$ ,  $t_i, t_j$  – времена прихода волны на датчики  $i$  и  $j$ ,  $c_0$  – средняя скорость звука.

Глубина срабатывания подводного источника взрыва  $z_s$  оценивалась на основе измерения периода времени  $T_1$  между приходом импульса от ударной волны и импульса от пульсации газового пузыря при известной мощности заряда в тротиловом эквиваленте  $W$  по следующей формуле (Коул Р., 1950; Громашева О.С., Захаров В.А., 2002).

$$T_1 = 2.08 W^{1/3} / (z_s + 10.07)^{5/6}. \quad (3)$$

Остановимся подробнее на программно-аппаратных средствах и алгоритмах работы радиогидроакустических буев, используемых в измерениях и результатах натуральных экспериментов.

В качестве аппаратных средств измерения и регистрации сигналов использовались радиогидроакустические буи, разработанные и изготовленные ФГУП «НИИПА», включающие:

- измерительный блок в составе: гидрофон, кабельная линия связи, одноплатный компьютер Helios HLV 1000-256AV со встроенным АЦП (16 бит), навигационный блок ГЛОНАСС/GPS;

- блок радиосвязи для передачи результатов обработки на удаленный пульт управления (ПУ) в составе: радиомодем СМАРТ-160/2400-03 и модуль связи Wi-Fi ASUS WL-330N.

Пульт управления в составе радиомодема и защищенного ноутбука Panasonic CF-31 располагался на судне обеспечения, находившемся на удалении.

### Алгоритмы обработки сигналов гидроакустических буев

Обработка гидроакустических сигналов при определении координат подводного источника заключается в:

- выделении импульсов, вызванных срабатыванием источника на фоне окружающего шума и реверберации;
- определении моментов времени прихода сигнала на гидрофоны радиобуев, разнесенных по водной акватории;
- передаче результатов обработки на пульт управления.

Особенностью алгоритмов, применяемых для решения данной задачи, является необходимость их непрерывного выполнения в реальном масштабе времени во встроенном ПО радиобуя в полностью автоматическом режиме. В связи с этим нерационально применение ресурсоемких алгоритмов корреляционного анализа и алгоритмов фильтрации на основе FFT.

При высоком отношении сигнал/шум для обнаружения импульса достаточно применения порогового алгоритма, приведенного на блок-схеме (рис. 1), с усреднением низкочастотных колебаний, вызванных волнением.

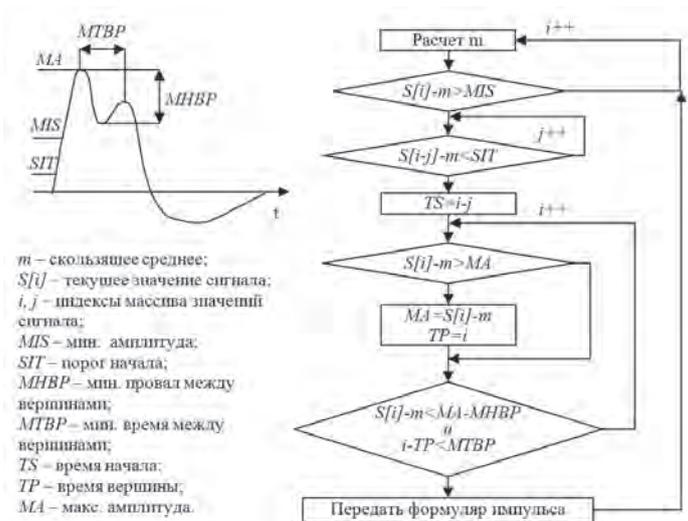


Рис. 1. Блок-схема порогового алгоритма обнаружения импульсов

Однако на больших расстояниях от источника прямой сигнал от взрыва поступает значительно ослабленным, с уровнем, сопоставимым с шумом, и существенно

ниже уровня реверберации. Для обнаружения подобных импульсов применяется алгоритм на основе метода зеркальной производной (Костенко К. В., Крюков Ю.С., 2016), который позволяет выделять сигналы малой амплитуды, но с острым фронтом (рис. 2).

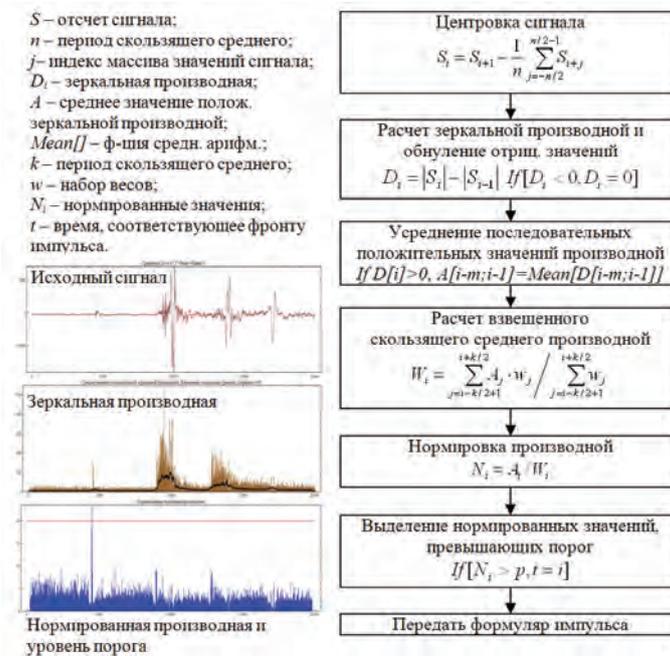


Рис. 2. Блок-схема алгоритма зеркальной производной

Недостатком данного алгоритма является ложное выделение слабых импульсов, вызванных высокочастотными помехами, например, от работы радиоканала. Данный недостаток устраняется путем комбинированного применения указанных алгоритмов. В этом случае импульс, обнаруженный с помощью метода зеркальной производной, считается полезным, если он сопровождается высокоамплитудными импульсами реверберации, превышающими заданный порог.

Определение абсолютного момента времени прихода импульса производится на основе данных GPS/ГЛОНАСС приемника, поступающих на дополнительный канал АЦП в виде ежесекундной метки PPS и цифрового кода с соответствующим ей временем. Точность синхронизации сигналов между автономно работающими радиобуями составляет 10 мкс (1 такт АЦП). В результате обнаружения импульса каждый радиобуй формирует короткий пакет с параметрами сигнала и передает по радиоканалу на пульт управления. Данный подход позволяет использовать низко-скоростной радиоканал (4800 бод) и достигать высокой дальности связи (до 20 км).

### Алгоритмы автоматизированной оценки координат источников и моделирования распространения сигналов на пульте управления

При поступлении формуляров с обнаруженными импульсами от радиобуев в СПО пульта управления производится их анализ и предварительная сортировка с целью определения их принадлежности к одному событию (рис. 3).



Рис. 3. Блок-схема алгоритма предварительной сортировки

При срабатывании одиночного источника основные трудности отнесения формуляра к событию вызваны ошибками 1-го и 2-го рода (пропуск/ложный) в ходе обнаружения импульсов. При групповых срабатываниях, разнесенных в пространстве, возникают дополнительные сложности, связанные с нарушением последовательности прихода импульсов на гидрофоны радиобуев. А поскольку поступление формуляров по радиоканалу может также происходить в произвольной последовательности и с определенной задержкой, то предварительная автоматическая сортировка импульсов по принадлежности к событиям имеет высокий процент ошибки, что приводит к неверной оценке координат источника. В связи с этим по окончании поступления формуляров по команде оператора производится повторная сортировка (рис. 4).



Рис. 4. Блок-схема алгоритма пересортировки

Эффективность алгоритма сортировки и качество последующих расчетов существенно повышаются при использовании в ходе измерений избыточного количества радиобуев.

В ходе подготовки к эксперименту производится моделирование распространения сигнала на основе ранее проведенных гидрологических исследований для

данной водной акватории и времени года, либо прямых измерений глубин и вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). На основе этих данных с помощью алгоритмов СПО пульта управления производится предварительное формирование точек установки и группировки радиобуев вокруг предполагаемого расположения источника и моделируются траектории распространения звуковых лучей, согласно закону Снеллиуса, (Бреховских Л.М., Годин О.А., 1989) с целью оценки времени, дальности распространения и степени затухания прямого сигнала для каждой измерительной точки (рис. 5).



Рис. 5. Расчет дальности распространения прямого сигнала для заданных глубин и ВРСЗ

По результатам моделирования корректируется положение радиобуев, подбирается глубина размещения гидрофонов и определяются параметры настройки регистрирующей аппаратуры для предстоящих измерений.

При расчете координат источника на точность результата оказывают существенное влияние следующие параметры: ошибки в измерениях собственных координат радиобуев; ошибки в определении абсолютного времени прихода импульса от источника и выбор конфигурации расположения радиобуев на акватории. В СПО пульта управления реализован алгоритм моделирования карты ошибок при расчете координат источника (Крюков Ю.С. и др., 2014) для выбранной конфигурации группировки радиобуев (рис. 6).

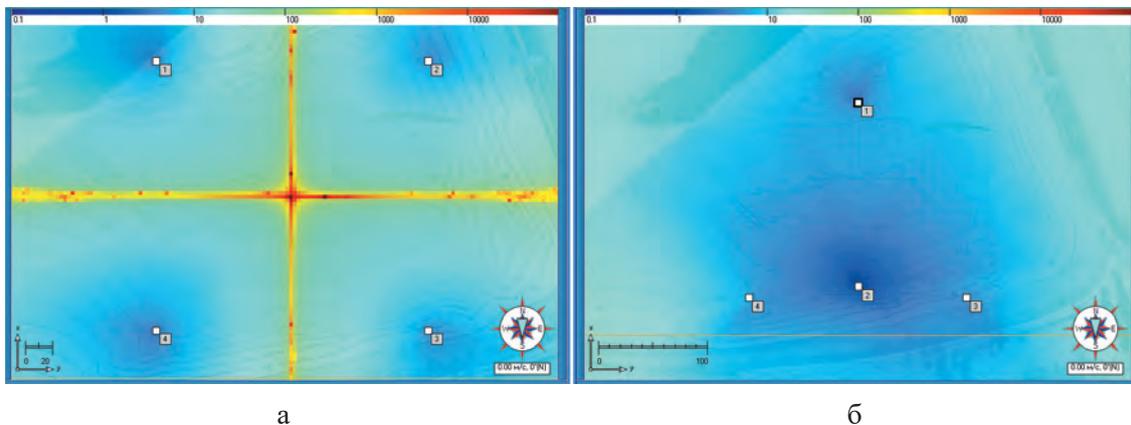


Рис. 6. Карты ошибок для неоптимальной (а) и оптимальной (б) конфигурации расположения системы радиобуев

В ходе подготовки к проведению измерений производится выбор оптимального размещения точек приема с целью получения максимального размера зоны расчета с допустимой погрешностью в районе предполагаемого местонахождения источника.

### Результаты натуральных экспериментов

Разработанные алгоритмы и методы, реализованные во встроенном ПО радиобуев и СПО пульта управления, применялись в ходе измерений, проводившихся на акватории Ладожского озера летом 2015 г. и акватории Черного моря летом 2016 г. В измерениях использовалась группа из 6–8 радиобуев. Пульт управления находился на судне обеспечения, удаленном на 3–5 км от источника. Оценка координат подводных взрывов источников массами 1, 5, 23 кг проводилась в реальном масштабе времени прихода сигналов на пульт управления. В ходе выполнения работ производились гидрологические измерения ВРСЗ, приведенные на рис. 7.

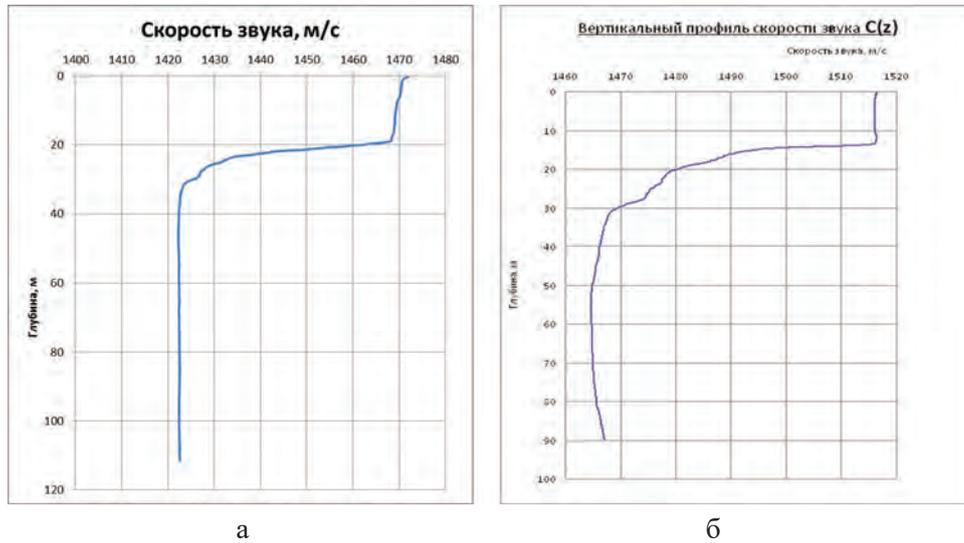


Рис. 7. ВРСЗ в Ладожском озере 08.2015 (а) и Черном море 07.2016 (б)

Синхронизированные временные реализации сигналов, принимаемых радиобуями в разных точках удаления от источника массой 1 кг, приведены на рис. 8.

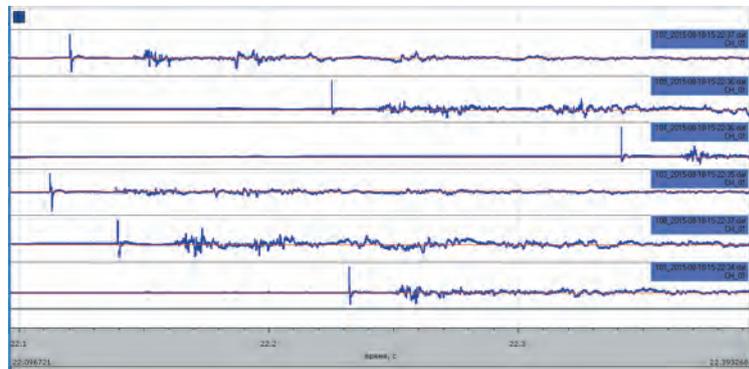


Рис. 8. Синхронизированные сигналы от источника массой 1 кг, поступившие на радиобуй № (на графике сверху вниз) 7(442 м), 5(587 м), 4(768 м), 3(437 м), 8(467 м), 1(645 м)

Результаты оценки координат на водной акватории и глубин срабатывания одиночных и групповых подводных импульсных источников отражены в виде красных звездочек с идентификаторами событий на рис. 9 и в численном виде в таблице 1.

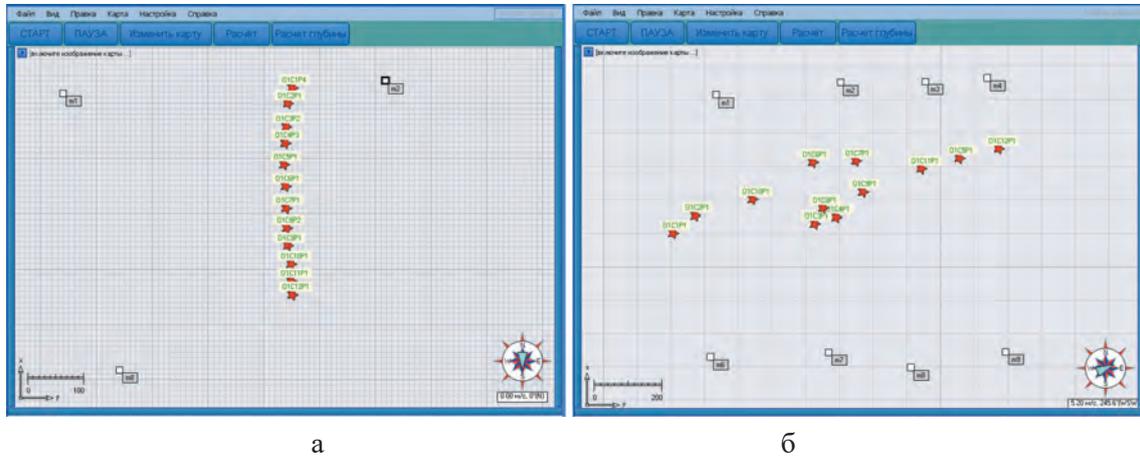


Рис. 9. Результаты расчета координат группы импульсных источников в Ладожском озере 08.2015 (а) и Черном море 07.2016 (б)

Точность дистанционных измерений контролировалась с помощью навигационных приемников NV08C-CSM-DR (ГПСИ №52614-13), размещаемых над источниками. Глубина контролировалась инструментальным способом при разметке подвеса источника.

Таблица 1. Результаты оценки координат в ходе натуральных экспериментов

Дата	Место	Число опытов	Средняя ошибка по (x; y), м	Средняя ошибка по (z), м
18.08.2015	Ладожское озеро, г. Приозерск	10 (одиночные)	5,28	2,21
19.08.2015		27 (групповые)	4,86	2,32
21.06.2016	Черное море, г. Феодосия	9 (одиночные)	7,35	1,77
22.06.2016		26 (групповые)	без контроля	3,6

Погрешность расчета координат источников не превысила  $\pm 7,35$  м при размерах испытательной морской акватории размещения радиобуев до  $1 \text{ км}^2$ .

Выводы: Разработанные и реализованные в виде СПО в радиобуях и пульте управления алгоритмы позволяют выполнять оценку координат и глубин срабатывания подводных импульсных источников на морской акватории площадью до  $1 \text{ км}^2$  в реальном масштабе времени поступления сигналов с погрешностью не превышающей  $\pm 7,35$  м.

### Литература

Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.  
Громашева О.С., Захаров В.А. Оценка глубины подводного взрыва методом модифицированного кепстрального анализа морской реверберации, обусловленного этим взрывом // Акуст. ж. 2002. Т. 48. № 3. С. 319–324.

- Костенко К.В., Крюков Ю.С.* Метод детектирования импульса прямого сигнала от подводного взрывного источника в волноводе // Акуст. ж. 2016. Т. 62. № 1. С. 111–116.
- Коул Р.* Подводные взрывы. М.: Иностранная литература, 1950. 418 с.
- Крюков Ю.С., Агейкин А.В., Коротаев Ю.В., Черепанов Е.О.* Дистанционная оценка координат срабатывания импульсного источника в водной среде в условиях интервальной неопределенности измерений координат точек приема сигнала // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2014. № 6 (14). С. 146323-1-146323-7.
- Крюков Ю.С.* Метод определения пространственных координат взрывных источников акустического сигнала в условиях ветровых помех // ЭНЖ Молекулярные технологии НИИПА. 2010. Т. 4. С. 122–137. [электронный ресурс] – Режим доступа. URL: <http://www.niipa.ru/journal/articles/7.pdf> (дата обращения 24.01.2018).

## SOFTWARE FOR PROCESSING HYDROACOUSTIC SIGNALS, MODELING AND REMOTE EVALUATION OF THE COORDINATES OF THE TRIGGERING OF UNDERWATER PULSED SOURCES

**Yu.S. Kryukov, E.O. Cherepanov**

*FSUE «Research Institute of Applied Acoustics». Dubna, Moscow Region, 141981, Russia.  
e-mail: [kryukov@niipa.ru](mailto:kryukov@niipa.ru), [evgeny.cherepanov@niipa.ru](mailto:evgeny.cherepanov@niipa.ru)*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

The problem of modeling and remote evaluation of the triggering coordinates of an underwater pulse source is considered. It realized on the basis of the determination of the timing of the arrival of signals on the hydrophones of the beacon at spatially separated points with known coordinates. Formulae for calculating the coordinates of underwater pulse sources for the analytical method and the method for minimizing the functional are given.

Algorithms of the embedded software for radio beacons for automatic processing of sonar signals and data transmission to the control panel are described. The algorithms of automated estimation of the coordinates of the operation of single and group underwater pulsed sources are presented in the software of the control panel. The algorithms developed to meet the requirements of real-time operation.

A description of software tools and algorithms for modeling the signal propagation from a pulsed source is given. They designed for the purpose of determining the parameters and permissible range of the measuring equipment during the preparation for the experiment. The questions of the optimal location of reception points for reducing the influence of errors in determining the radio beacon's own coordinates on the results of calculations are considered. The results of hydrological measurements and full-scale experiments on the evaluation of coordinates and depths of operation of underwater pulsed sources in the conditions of the Ladoga Lake and Black Sea waters are presented.

**Keywords:** software, hydroacoustic signals processing, modeling, remote coordinate estimation, underwater pulse source, results of marine experiments

## References

- Brekhovskikh L.M. and Godin O.A.* Akustika sloistykh sred. Moscow: Nauka Gl. red. Fiz-mat. lit., 1989.
- Gromasheva O.S. and Zakharov V.A.* Otsenka glubiny podvodnogo vzryva metodom modifitsirovannogo kepstral'nogo analiza morskoy reverberatsii, obuslovlennogo etim vzryvom. *Akust. zh.*, 2002, Vol. 48, No. 3, pp. 319–324.
- Kostenko K.V. and Kryukov Yu.S.* Metod detektirovaniya impul'sa pryamogo signala ot podvodnogo vzryvnogo istochnika v volnovode. *Akust. Zh.*, 2016, Vol. 62, No. 1, pp. 111–116.
- Koul R.* Podvodnyye vzryvy. M.: Inostrannaya literatura, 1950, 418 p.
- Kryukov Yu.S., Ageykin A.V., Korotayev Yu.V., and Cherepanov E.O.* Distantionnaya otsenka koordinat sbratyvaniya impul'snogo istochnika v vodnoy srede v usloviyakh interval'noy neopredelennosti izmereniy koordinat toчек priyema signala. *Uchenyye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta*, 2014, No. 6(14), pp. 146323-1-146323-7.
- Kryukov YU.S.* Metod opredeleniya prostranstvennykh koordinat vzryvnykh istochnikov akusticheskogo signala v usloviyakh vetrovykh pomekh. *ENZH Molekulyarnyye tekhnologii NIIPA*, 2010, Vol. 4, pp. 122–137, [elektronnyy resurs] Rezhim dostupa. URL: <http://www.niipa.ru/journal/articles/7.pdf> (last accessed in 24.01.2018).

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ ПИНГЕРОВ БЕЗ ПОДЗАРЯДКИ

**А.В. Носов, Н.Ф. Тихонова**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36, e-mail: a\_v\_nos@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.09.2018

Приведены и обсуждены результаты лабораторных исследований зависимости качества регистрации сигналов пингера в двух режимах излучения – с укороченными посылками и с увеличенными интервалами следования. Целью исследования был выбор оптимального режима увеличения продолжительности работы пингера без подзарядки.

**Ключевые слова:** пингер, подзарядка, время жизни

В Лаборатории акустики океана в 2010 г. были проведены первые успешные испытания пингера и системы приема и отображения его сигналов. Главной особенностью этого оборудования являлся тот факт, что оно дало возможность отказаться от использования штатных судовых устройств, в том числе блока синхронизации и регистратора на базе электрохимической бумаги, при существенном увеличении качества получаемых данных (Демидова и др., 2012).

С тех пор и сам пингер, и система приема были многократно модернизированы и усовершенствованы (Демидова и др., 2013; Носов и др., 2013). В частности, на плате пингера были установлены переключатели для уменьшения длительности посылок, что позволило совместно с модификацией программы системы приема обеспечить увеличение физического разрешения по времени, а также сократить мертвую зону вблизи дна. Переключатели однобитные, их пара позволяла выбрать один из четырех возможных режимов работы. В действительности были реализованы только три режима – с длительностью посылок 2, 1 и 0.5 мс. При минимальной длительности излучалось всего 5 периодов несущей частоты, реализовывать меньшую длительность не представлялось целесообразным.

В ходе эксплуатации системы пингерного контроля приближения к дну различных океанологических приборов была выявлена необходимость увеличения времени работоспособности пингера после однократной зарядки аккумуляторной батареи. В частности, это необходимо при большом времени непрерывного измерения вблизи дна или при длительном периоде постановки и подъема измерительной аппаратуры. Главным фактором потребления энергии при работе пингера является процесс излучения звукового импульса. Перестраивать выходной каскад аналоговым способом с целью сокращения потребления в ходе экспедиции представляется сложным и рискованным мероприятием, поскольку требует высокой квалификации

персонала и даже при этом не гарантирует успеха, учитывая необходимость многократного вмешательства в электронную структуру оборудования методом горячего монтажа. Наиболее эффективным представляется использование возможностей программирования и стандартных переключателей для изменения режима работы пингера цифровым способом.

Возможны три способа изменения потребления энергии в режиме излучения звука. Первый – изменение скважности управляющего сигнала, то есть сокращение длительностей импульсов тока через выход транзистора. Этот способ требует весьма точной настройки программы и высокой скорости работы управляющего контроллера без гарантии обеспечения требуемого результата.

Второй способ – сокращение длительности излучаемых посылок, реализованный в описываемой в настоящей работе оригинальной конструкции пингера.

Третий способ – излучение звука не раз в секунду, а с пропуском определенного количества моментов излучения. Данная работа посвящена сравнению двух последних способов экономии энергии.

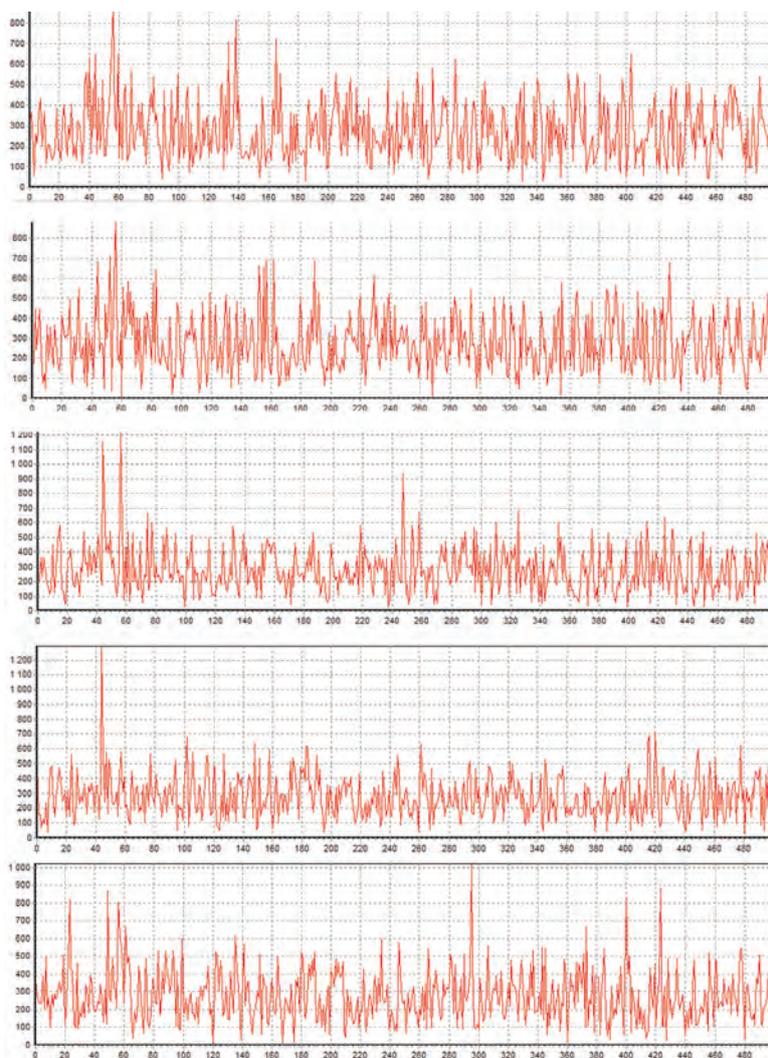


Рис. 1. Реализации сигнала пингера, принятые в ходе эксперимента при длительности посылок 2 мс

В ходе работы была собрана лабораторная установка, состоящая из пингера, устройства приема его сигналов, звуковой колонки, источника шумового сигнала и компьютера. Результатом работы было получение стандартной полутоновой картинки, состоящей из вертикальных линий, соответствующих интервалу приема сигнала в течение 1 с, кодированных градациями серого, причем, чем сильнее был сигнал, тем темнее был оттенок серого. В ходе эксперимента взаимное расположение приемника и излучателя не менялось, также сохранялся уровень излучаемого шума. Полоса шума определялась частотными характеристиками звуковой колонки и приемника, в качестве которого использовался пьезокерамический преобразователь, аналогичный излучателю пингера. Для визуальной оценки использовавшегося уровня шума на рис.1 представлены примеры типичных реализаций сигналов при длительности посылки 2 с с интервалом 1 с. Сигнал пингера похож на реверберационный в силу того, что в его формировании принимают участие не только прямой, но и отраженные внутри помещения вторичные сигналы.

Первоначально было произведено исследование зависимости качества записи сигналов пингера от интервала следования посылок. Результат представлен на рис. 2.

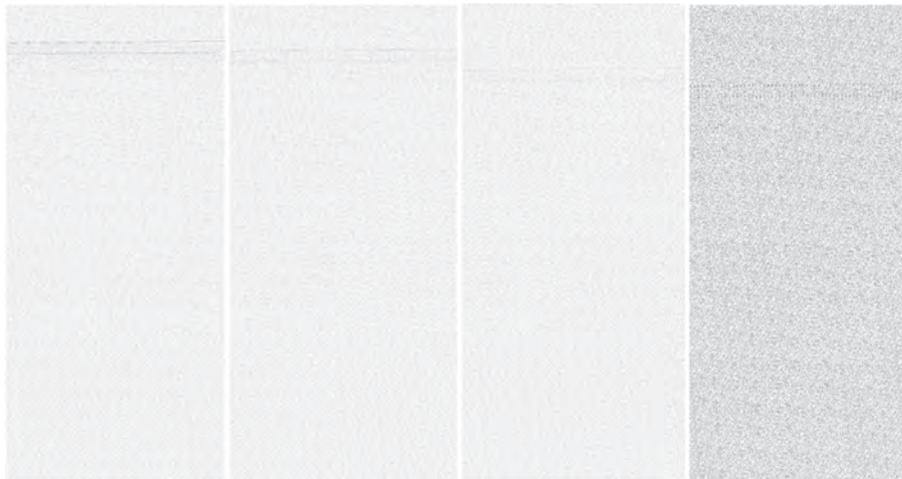


Рис. 2. Зависимость качества записи сигналов пингера от интервала следования посылок.

Первый столбец – интервал 1 с, второй – 2 с, третий – 3 с, четвертый – 4 с.

Длительность посылок – 2 мс

Видно, что при не слишком высоких требованиях к точности измерения дистанции до дна, а также при невысокой динамике изменения глубины, сигнал можно проследить вплоть до длительности интервала повторения посылок 4 с. При этом естественно ожидать, что время работы пингера до необходимости подзарядки аккумулятора увеличится в четыре раза по сравнению со стандартным и при некоторых типах батарей составит до 100 часов.

На рис. 3 представлены результаты проверки качества записи сигналов пингера в зависимости от длительности посылок. В первом столбце представлен опорный сигнал пингера с параметрами: длительность 2 мс, период следования посылок 1 с. Во втором столбце представлен результат работы пингера в режиме излучения

посылок один раз в секунду с длительностью 1 мс. Третий столбец соответствует режиму излучения 0.5 мс один раз в секунду.

В отличие от данных рис. 2, где сигнал прослеживается вплоть до интервала следования посылок 4 с, уже во втором столбце наблюдаются участки, где сигнал не виден вообще, что исключает возможность непрерывного контроля положения прибора относительно дна и тем самым снижает безопасность используемого оборудования.



Рис. 3. Зависимость качества сигналов пингера от длительности посылок при интервале следования 1 с. В первом столбце длительность 2 мс, во втором – 1 мс и в третьем – 0.5 мс

Представленные материалы свидетельствуют в пользу того, что режим излучения пингера с увеличенным интервалом предпочтительнее режима с укороченной посылкой. В настоящее время в конструкции пингера есть возможность выбирать один из всего четырех режимов излучения – три из них меняют длительность посылок, а четвертый позволяет выбрать режим с прореживанием, величина которого устанавливается при программировании контроллера. Потенциальный пользователь прибора должен сам задать интервал между циклами излучения, исходя из своего опыта, условий работы и потребностей в экономии энергозапаса батареи.

Следует отметить, что такие жесткие условия работы, какие были использованы во время проведения эксперимента, – отношение сигнал/шум примерно 6 дБ – далеко не всегда имеют место на практике.

На рис. 4 представлена запись сигналов пингера, полученная в реальных условиях при глубине места 2880 м с интервалом между посылками 2 с при длительности посылок 2 мс. И прямой сигнал от пингера, и отраженный от дна отчетливо видны практически непрерывно даже в присутствии сильных импульсных помех, источником которых являлись другие акустические приборы (эхолот, мультибим), работавшие одновременно с пингером.

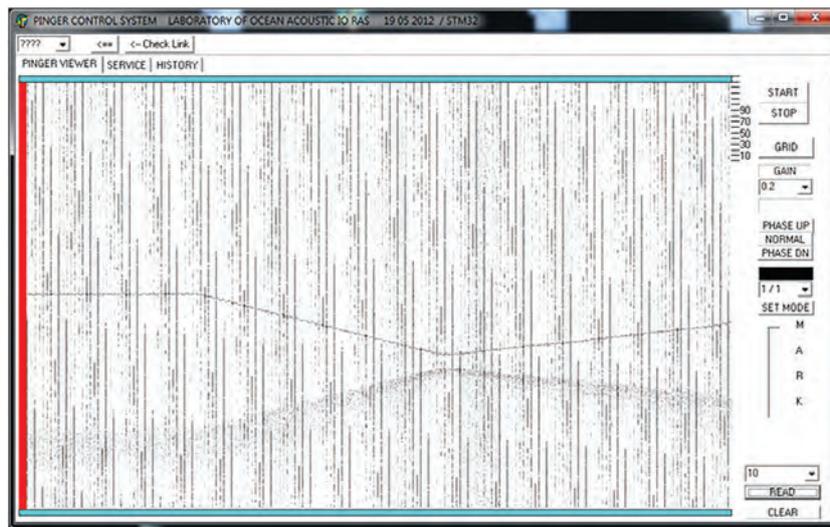


Рис. 4. Запись сигналов пингера при глубине места 2880 м.  
Длительность посылок 2 мс, интервал следования – 2 с

В результате лабораторных экспериментов в Лаборатории Акустики ИО РАН показана реальная возможность многократного увеличения продолжительности работы пингера оригинальной конструкции без подзарядки. Установлено, что режим излучения пингера с увеличенным интервалом предпочтительнее режима с укороченной посылкой.

Полагаем, подтверждение реального увеличения времени жизни пингера без подзарядки в условиях реального океана будет получено в ходе его использования в практических работах.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0149-2018-0010.

### Литература

- Демидова Т.А., Сколотнев С.Г., Тихонова Н.Ф. Тестирование цифровой системы пингерного контроля глубоководных приборов относительно дна // Электронный научный журнал Исследовано в России. 2012. № 15. С. 364–376.
- Демидова Т.А., Носов А.В., Тихонова Н.Ф. Цифровая система пингерного контроля глубоководных приборов // Сборник трудов XIII Международной конференции МСОИ-2013 / Современные методы и средства океанологических исследований: Том I. Москва: Институт океанологии РАН, 2013. С. 158–162.
- Носов А.В., Демидова Т.А., Тихонова Н.Ф., Юрицын В.В. Развитие аппаратуры для обслуживания пингеров // Сборник трудов XIII Международной конференции МСОИ-2013 / Современные методы и средства океанологических исследований: Том I. Москва: Институт океанологии РАН, 2013. С. 162–166.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT METHODS FOR INCREASING OF PINGER WORK TIME DURATION WITHOUT RECHARGING

**A.V. Nosov, N.F. Tihonova**

*Shirsov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. Nakhimovsky prospect, 36,  
Moscow, 117996, Russia*

*e-mail: a\_v\_nos@mail.ru, nnaft@mail.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.09.2018

Results of laboratory examination of data quality are presented and discussed for two modes of pinger radiation modes – with reduced pulse duration and increased repeating interval time. Investigation aim was to choose the best way of increasing pinger work time duration without recharging.

**Keywords:** pinger, recharging, work time duration

### Referenses

- Demidova T.A., Skolotnev S.G., and Tihonova N.F.* Testirovanie cifrovoj sistemy pingernogo kontrolja glubokovodnyh priborov odnositel'no dna. (Testing of the Digital Pinger Control System of deep-sea Instruments Relative to the Bottom), *Jelektronnyj nauchnyj zhurnal Issledovano v Rossii*, 2012, No. 15, pp. 364–376.
- Demidova T.A., Nosov A.V., and Tihonova N.F.* Cifrovaja sistema pingernogo kontrolja glubokovodnyh priborov. (Digital Pinger Control System for Deep-sea Instruments), *Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoj konferencii MSOI–2013 (Proceedings of the International Conference MSOI–2013), Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovanij, (Modern methods and means of oceanology research): Vol. I, Moscow: Shirshov Institute of oceanology of RAS, 2013, pp. 158–162.*
- Nosov A.V., Demidova T.A., Tihonova N.F., and Juricyn V.V.* Razvitie apparatury dlja obsluzhivanija pingerov (Development of Equipment for the Maintenance of Pinger). *Sbornik trudov XIII Mezhdunarodnoj konferencii MSOI–2013, (Proceedings of the International Conference MSOI–2013), Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovanij, (Modern methods and means of oceanology research): Vol. I, Moscow: Shirshov Institute of oceanology of RAS, 2013, pp. 162–166.*

## ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ПРОФИЛИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

А.Г. Островский

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, Москва, Нахимовский проспект д. 36, e-mail: osasha@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Автономные подводные профилирующие аппараты (АППА) предназначены для измерений вертикальных профилей течений и характеристик морской среды. К АППА относятся зонды, перемещающиеся по вертикально натянутому тросу на буйковых станциях. С помощью профилографа измерения выполняются одним набором датчиков во всем столбе воды от приповерхностного слоя до дна, что позволяет получить однородные данные с одинаковой точностью. При работе аппарат поддерживает стабильную ориентацию относительно направления течения, что немаловажно для измерений скорости и направления течений. В целом, такой аппарат представляет собой удобную платформу для размещения гидроакустического оборудования. В статье на примере заякоренного подводного профилирующего аппарата Аквалог рассмотрен состав гидроакустического оборудования АППА, предназначенного для связи и передачи данных, для измерений скорости течения и мелкомасштабных неоднородностей, а также для пеленгации самого аппарата.

**Ключевые слова:** автономные подводные профилирующие аппараты, акустический доплеровский измеритель течений, гидроакустический маяк, измеритель обратного рассеяния звука, гидроакустический модем

### Введение

Беспилотные аппаратные платформы для зондирования Мирового океана часто используются в качестве носителей гидроакустического оборудования. Движущиеся беспилотные аппаратные платформы широко применяются для выполнения разрезов и площадных съемок в Мировом океане. Гидроакустическое оборудование в таких аппаратах используется в первую очередь для навигации и связи (см., например, Ваулин и др., 2017). Полезная нагрузка автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), как правило, включает гидролокатор бокового обзора и акустический (Борейко и др., 2011; Матвиенко и др., 2015). На АНПА также устанавливают векторно-скалярный приемник и многолучевой эхолот. АНПА оснащают акустическим доплеровским профилографом течений (ADCP) для проведения измерений по маршруту движения. Для гидроакустического мониторинга наиболее приспособлены глайдеры, бесшумно планирующие под водой (D'Spain et al., 2005; D'Spain et al., 2007; D'Spain et al., 2007). Планер глайдера X-Ray имеет широкие крылья, несущие решетки гидроакустических антенн. Более поздняя версия такого глайдера, получившая название Z-Ray, укомплектована антеннами, работающими как минимум в 3-х диапазонах: 10 Гц–15 КГц, 10 Гц–100 КГц, 20 Гц–2 КГц.

В отличие от АНПА и глайдеров, заякоренные автономные подводные профилирующие аппараты (АППА) предназначаются в основном для получения временных рядов вертикальных профилей гидрофизических, акустических и биологических характеристик в фиксированных географических точках (Ostrovskii et al., 2011; Островский и др., 2013). Особую ценность представляют регулярные однородные измерения вертикальных профилей характеристик морской среды, которые наряду с разрезами и площадными съемками позволяют изучить временную изменчивость в целях четырехмерной океанографии. При этом важную роль играет гидроакустическое оборудование. Ниже на примере аппарата Аквалог рассмотрены состав и область применения гидроакустической аппаратуры, устанавливаемой на АППА.

### **Заякоренный мобильный профилирующий аппарат Аквалог**

Заякоренный профилограф Аквалог предназначен для измерений гидрофизических, гидрохимических и биоокеанологических характеристик в фиксированной географической точке акватории (Ostrovskii et al., 2011; Островский и др., 2013). Измерения выполняются одним набором датчиков от приповерхностного слоя до придонного слоя с вертикальным разрешением не хуже 1 м, что позволяет получить однородные данные с одинаковой точностью.

Аппарат регулярно по установленной программе перемещает полезную нагрузку с заданной скоростью с помощью электромеханического привода по тросу буйковой станции между подповерхностной плавучестью и донным якорем. Перемещение осуществляется за счет вращения приводного ролика, взаимодействующего с буйрепом. Аппарат имеет удобообтекаемую форму, чтобы поддерживать стабильную ориентацию относительно течения, что немаловажно для измерения его скорости и направления.

Станция Аквалог, как правило, ставится в море на долгий срок до 1 года. В результате исследователь получает длительные временные ряды вертикальных тонкоструктурных профилей параметров морской среды.

Аппарат изготавливается мелкими сериями в 3-х модификациях, в зависимости от глубины постановки и продолжительности автономной работы с учетом требований к составу океанологических измерительных датчиков. В стандартном исполнении аппарат имеет максимальную рабочую глубину 1000 м, при этом габариты и масса носителя в воздухе составляют соответственно  $1.45 \times 0.35 \times 0.65$  м и 68 кг (рис. 1). Аппарат для работы в области шельфа и верхней части континентального склона на глубинах до 500 м имеет меньшую длину – 1.15 м и массу около 48 кг. Аппарат для долговременных постановок имеет те же габариты, что и стандартный, при большей массе на 4 кг и при увеличенной емкости батарейного блока на 30%, но может использоваться только с определенными океанологическими датчиками.



Рис. 1. Заякоренный мобильный профилирующий аппарат Аквалог в стандартном исполнении с навесными океанологическими датчиками и гидроакустическим модемом EvoLogics S2C R (в верхней части прибора)

### **Гидроакустическое оборудование профилографа Аквалог**

Гидроакустическое оборудование применяется в профилографе Аквалог для решения следующих задач:

- контроля местоположения аппарата;
- передачи данных измерений и получения команд;
- акустического доплеровского измерения скорости течения;
- измерения обратного рассеяния звука на внутриводной взвеси.

#### *Гидроакустический маяк*

Определение местоположения аппарата Аквалог под водой важно, так как буйковая станция с притопленной плавучестью ставится скрытно. При постановке станция может отдрейфовать или сползти по наклонному дну под действием сильного течения. Для поиска станции перед ее подъемом целесообразно точнее определить ее местоположение. Местоположение аппарата контролируется с помощью пеленгатора на судне и источника звука (пингера) на самом аппарате. Пеленг определяется в системе координат, связанной с обеспечивающим судном, на котором установлен пеленгатор.

Принцип действия пеленгатора, как правило, основан на определении в одной точке приема давления и градиента давления импульсного акустического сигнала, регистрируемого приемной антенной с ультракороткой базой. Направление на источник сигнала, устанавливаемый на подводном аппарате, определяется относительно опорного направления несущей конструкции.

Например, основные технические характеристики пеленгатора «Вектор», разработанного ООО НПП АКМА (<http://www.npo-akma.ru/vector.html>):

- диапазон рабочих частот, кГц: от 5 до 20;
- погрешность определения пеленга, град.: 5.

В состав гидроакустического пеленгатора «Вектор» входят:

- приемная антенна, размещаемая на несущей конструкции (плавсредстве);
- блок вычисления пеленга на базе спецпроцессора;
- пингер;
- специализированное программное обеспечение.

На аппарате Аквалог могут устанавливаться маяки и транспондеры производства других компаний, например JW Fishers (<http://www.jwfishers.com/products.html>). JW Fishers производит маяки и транспондеры с возможностью выбора частоты перед установкой, которые могут быть настроены на работу на любой частоте в диапазоне от 20 до 50 кГц с дискретным шагом по 500 Гц. Маяки имеют гибкие настройки длительности подачи импульсов, выходной акустической мощности и интервала времени между импульсами. В зависимости от настроек и емкости батареи, они могут работать от нескольких дней до нескольких месяцев. Маяки могут включаться автоматически при попадании в воду или вручную при помощи выключателя.

#### *Гидроакустический модем*

Для передачи телеметрической информации, команд и данных измерений в составе профилографа Аквалог используются цифровые гидроакустические модемы EvoLogics ([https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm\\_series.html](https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm_series.html)) (рис. 2) или Teledyne Benthos (<http://www.teledynemarine.com/acoustic-modems>) (рис. 3).



Рис. 2. Гидроакустический модем EvoLogics S2C R на аппарате Аквалог

Использование гидроакустического модема EvoLogics S2C на профилографе Аквалог было описано в статье (Островский и др., 2009). Здесь отмечу лишь, что этот модем является многофункциональным и применяется в качестве:

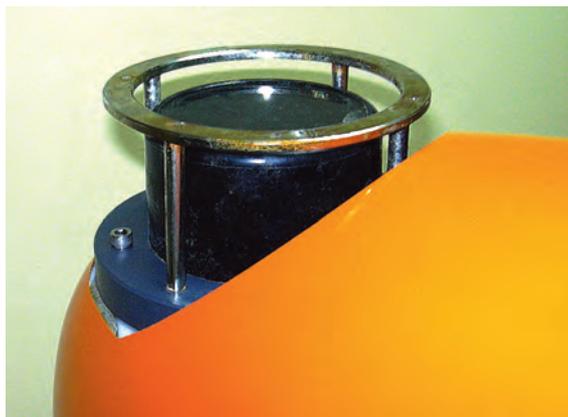


Рис. 3. Гидроакустический модем Benthos ATM585 на аппарате Аквалог

- устройства скоростной передачи данных 6.5–56 кбод (канал данных);
- устройства многопоточной передачи данных – 8, 16 асинхронных / параллельных потоков / логических каналов с управляемыми приоритетами;
- устройства робастной передачи управляющих команд с пониженной скоростью (канал управления).

Причем он может использоваться для реализации отдельного устройства (из указанных выше) или в качестве комбинированного устройства, выполняющего функции множества устройств на базе одного единственного модема. В случае одновременного использования одного и того же модема для организации канала данных и канала управления обеспечивается режим доставки команд управления в качестве срочных/внеочередных сообщений.

Рабочая дальность модема EvoLogics S2C R 40/80 составляет 2 км, максимальная дальность – 2.5 км; скорость передачи данных достигает 33 Кбит/с.

#### *Измеритель течений*

Профилограф Аквалог находится в сцеплении с вертикально натянутым буйрепом в трех точках: на верхнем и нижнем направляющем роликах и на шкиве электропривода. Его кожух имеет форму обтекаемого вертикального крыла длиной 0.6 м и шириной 0.35 м. Благодаря этому осуществляется стабилизация положения аппарата в потоке воды, что дает возможность проводить измерения скорости течения. Основы акустического доплеровского метода в приложении к дистанционному измерению течения в океане изложены в работах (Муякшин, 1989; Муякшин, Селивановский, 1982; Муякшин и др., 1984).

Для профилографа Аквалог была проведена системная интеграция пока лишь трех акустических доплеровских измерителей течений: Teledyne RDI (TRDI) DVS (<http://www.teledynemarine.com/doppler-volume-sampler/?BrandID=16>, рис. 4) и Nortek Aquadopp (<https://www.nortekgroup.com/products/aquadopp-3000m>, рис. 5) и Nortek Vector (<https://www.nortekgroup.com/products/vector-300-m>). Из-за особенностей конструкции аппарата Аквалог измеритель TRDI DVS монтируется только в нижней части прибора, а измеритель Nortek Aquadopp – в верхней или в нижней частях прибора.

При монтаже в верхней/нижней части прибора измерения производится путем импульсного зондирования водной толщи снизу вверх/сверху вниз.



Рис. 4. Акустический доплеровский профилограф течений Teledyne RDI DVS на аппарате Аквалог (Красное море, 2011 г.)

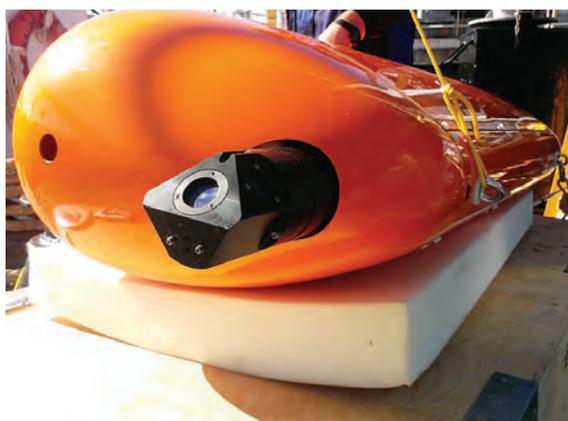


Рис. 5. Глубоководный акустический доплеровский измеритель течений Nortek Aquadopp 3000 m на профилографе Акалог (Японское море, 2014 г.)

Прибор Teledyne RDI (TRDI) DVS работает на частоте 2458 кГц. В его основе – классический 4-лучевой широкополосный акустический доплеровский профилограф течения (Brumley et al., 1996), причем лучи направлены под углом  $45^\circ$  к вертикальной оси. Прибор измеряет доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала по каждому из лучей с частотой до 40 Гц и, используя данные измерений по всем 4 лучам, рассчитывает с частотой 1 Гц направление и скорость течения в 5 слоях вдоль продольной оси прибора на удалении до 5 м относительно головки излучателей.

Прибор Nortek Aquadopp выпускается и как профилограф, и как «точечный» измеритель. Это 3-лучевой прибор. Изначально он был узкополосным, но производитель перешел на широкополосную технологию, после завершения срока действия соответствующего патента на изобретение (Brumley et al., 1996). Nortek Aquadopp излучает сигнал на частоте 2 МГц. Измерения проводятся с частотой до 23 Гц, а скорость течения стандартно рассчитывается с частотой 1 с.

Прибор Nortek Aquadopp выпускается с антенными головками разных геометрических конфигураций, одна из которых представляет особый интерес для использования на профилирующем носителе Аквалог. Речь идет об антенной головке, в которой два излучателя из трех работают в плоскости перпендикулярной продольной оси прибора (рис. 6). Так как прибор Aquadopp устанавливается вертикально на носитель Аквалог, два луча зондируют воду под малыми углами к горизонтальной плоскости, что позволяет проводить измерения с высоким разрешением по вертикали примерно 0.2 м, так как скорость перемещения носителя Аквалог, как правило, составляет около 0.2 м/с. Причем измеритель Aquadopp повернут на носителе таким образом, чтобы луч В3 находился в вертикальной плоскости перпендикулярной вертикальной продольной плоскости, т.е. излучатели зондировали водную среду с боковой стороны от носителя, где минимальны гидродинамические возмущения, возникающие при обтекании системы в потоке воды.



Рис. 6. Головка излучателей прибора Nortek Aquadopp 300 м.  
Вверху – общий вид, внизу – схема акустических лучей В1, В2, В3

Каждый из измерителей течений, интегрированных на аппарате Аквалог, имеет свои преимущества. Помимо апертуры антенны, другим важным критерием выбора измерителя является частота определения азимута и углов дифферента и крена акустической антенны. Акустический доплеровский измеритель течений имеет встроенный инклинометр и компас. Эти датчики дают важную информацию о положении всей системы под водой и учитываются при расчетах скорости течения. У прибора Teledyne RDI (TRDI) DVS частота опроса инклинометра и компаса составляет 15 Гц, а у прибора Nortek Aquadopp только 4 Гц, причем в мелководном его варианте. Чем чаще обновляется информация о положении акустической антенны, тем меньше погрешности расчета скорости течения, связанные с поступательным движением и вращением измерительной системы относительно буйрепа. Для того, чтобы провести максимально полную коррекцию данных о скорости

течения на эффекты, связанные с колебаниями буйрепа, необходимо восстановить движение системы под водой, а для этого надо иметь как минимум 3 дополнительных инерциальных датчика, например, типа XSENSE MTi 100 в нижней, центральной и верхней частях профилирующего носителя для отслеживания его перемещений в трехмерном пространстве. Отмечу, что колебания буйрепа, заякоренного на дне и натянутого притопленной плавучестью вертикально, возникают под воздействием течений и внутренних волн на притопленную плавучесть и могут быть значительными по амплитуде. Колебания можно отфильтровать статистическими методами, но за счет частичной потери информации о тонкой структуре течений. Как правило, на этапе предварительной обработки используется окно усреднения 5 с для фильтрации эффектов колебаний измерительной системы, поэтому в таком случае после предварительной обработки вертикальные профили скорости течений имеют разрешение 1 м.

Описанный выше подход к измерению вертикального профиля скорости течения имеет ряд преимуществ по сравнению с обычным методом измерений с помощью акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) на буйковой или донной станции. Для примера, в табл. 1 приведены характеристики двух измерительных систем Nortek ADCP Signature55 и носителя Аквалог с измерителем Nortek Aquadopp.

Таблица 1. Характеристики измерительных систем Nortek ADCP Signature55 и Nortek Aquadopp на носителе Аквалог

Параметр	Nortek ADCP Signature55	Nortek Aquadopp на носителе Аквалог
Рабочая частота	55 кГц	2000 кГц
Дальность или рабочий диапазон системы	2–1000 м	5–1000 м
Вертикальный размер объема воды, в котором вычисляется скорость течения	5 м	1 м
Горизонтальный размер объема воды, в котором вычисляется скорость течения	64 м на дальности 100 м, 642 м на максимальной дальности 1000 м	0.75 м
Время осреднения по 100 звуковым импульсам	300 с	< 5 с

Nortek ADCP Signature55 излучает ультразвуковые импульсы в трех конусных лучах (угол раствора 4.5°–5.5°) и улавливает эхо-сигналы, отраженные от отдельных рассеивателей или групп рассеивателей, измеряя доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала послойно в слоях заданной толщины в каждом конусном луче. При этом для вычисления вектора скорости течения предполагается, что скорость течения не меняется в объеме тетраэдра, ребрами которого служат конусные лучи.

Поскольку конусные лучи наклонены относительно вертикальной оси на угол  $20^\circ$ , на дальности 1000 м от антенны они разнесены по горизонтали на расстояние около 640 м. Предположение об отсутствии горизонтального сдвига скорости течений на таком расстоянии не вполне приемлемо.

Применительно к прибору Nortek Aquadopp, работающему на частоте 2000 кГц, значительно более реалистично допущение, что подавляющее число неоднородностей водной среды, участвующих в создании эхо-сигналов, пассивно переносится окружающей жидкостью. А вот отражение на частоте 55 кГц более чувствительно к крупным объектам (размером более 7 мм), включая нектон, то есть активно плавающим организмам, способным противостоять силе течения и самостоятельно перемещаться, что может вносить дополнительную неопределенность в измерения скорости течения прибором Nortek ADCP Signature55.

Для получения надежной оценки среднего значения скорости течения целесообразно осреднить данные по 100 зондирующим импульсам. Этого достаточно, чтобы получить статистически значимые оценки каждые 5 с по слоям толщиной примерно 1 м. Отмечу, что для выполнения всего 1000 м профиля носителю Аквалог понадобится  $5 \cdot 10^3$  с. Это почти в 17 раз дольше, чем требуется для достоверной оценки среднего профиля скорости течения в том же столбе воды с помощью Nortek ADCP Signature55, конечно, при условии, что течение горизонтально однородно на масштабе порядка 100 м, а стаи нектона отсутствуют.

С помощью акустических доплеровских измерителей на носителях Аквалог удалось получить тонкоструктурные профили течений во многих морях России, а также в Средиземном, Красном и Мертвом морях. В Черном море станция Аквалог работала с 2011 по 2017 гг., а в Балтийском море с 2014 г. по настоящее время.

На рис. 7 представлен пример данных измерений течения в точке  $44^\circ 29.44' \text{ с. ш.}$ ,  $37^\circ 58.38' \text{ в. д.}$  на изобате 265 м на траверзе Геленджикской бухты Черного моря в период с 26 июня по 22 августа 2011 г. Каждые сутки профилограф автоматически выполнял 8 циклов профилирования. В начале каждого цикла профилограф опускался с парковочного горизонта 100 дбар до глубины 200 дбар, выстаивался 3 мин., затем поднимался до отметки 15 дбар, выстаивался 15 мин. и опускался на парковочный горизонт. На выполнение одного цикла профилирования уходило около 52 мин. Как следует из рис. 7, в период наблюдений прошли два прибрежных антициклональных вихря (ПАВ) 2–6 июня и 17–23 августа. Измерения с помощью Nortek Aquadopp на носителе Аквалог позволяют детально описать вертикальную структуру вихрей. Ядро первого вихря располагалось в слое 30–130 м. Второй вихрь был мощнее, максимальная скорость течения превышала 0.4 м/с. Также на протяжении всей постановки были развиты инерционные колебания. Их интенсивность была довольно необычной для летнего сезона, когда должна преобладать маловетренная погода. Причем спектральный анализ показал, что пик инерционных колебаний приходится на период 16.1 часа, то есть меньше на 1 час значения периода, рассчитанного по классической формуле для инерционных колебаний.

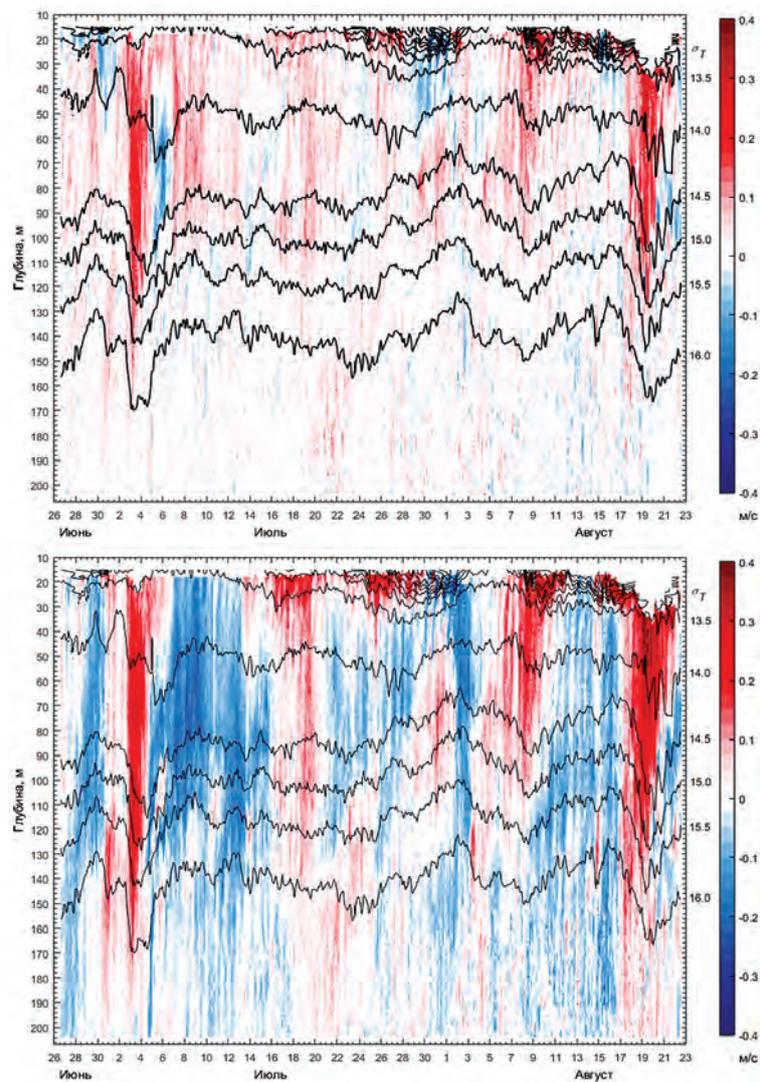


Рис. 7. Скорость течения над верхней частью континентального склона в районе Геленджикской бухты Черного моря летом 2011 г. по данным измерений Nortek Aquadopp 3000 m на носителе Аквалог. Вверху – кросс-шельфовый компонент скорости (положительное направление на северо-восток –  $30^\circ$ ), внизу – вдоль-шельфовый компонент скорости течения (положительное направление на северо-запад -  $300^\circ$ ). Черными линиями показаны изопикны по данным STD-зонда Idronaut 316 STD, также установленного на профилографе Аквалог

*Измеритель обратного рассеяния звука*

Для исследования тонкой структуры океанской экосистемы необходимы вертикальные профили характеристик морской среды с разрешением не хуже 1 м. Тонкие звукорассеивающие слои указывают на скопления фитопланктона и мезозoopланктона в зонах скачков плотности и повышенных градиентов температуры и солености воды. Скопления биоты могут исчезнуть в считанные часы под воздействием быстрых гидрофизических процессов, таких как тонкоструктурные интрузии и конвекция. Для наблюдений перемежающихся явлений и внутрисуточных изменений в экосистеме достаточно проводить измерения вертикальных профилей

1 раз в час. За это время аппарат АППА Аквалог выполняет цикл спуск/подъем в 300-метровом слое воды.

Акустические доплеровские измерители течений на профилографе Аквалог регистрируют интересные данные об эхо-сигнале. На частотах 2000 кГц и выше, на которых работают приборы Nortek Aquadopp и TRDI DVS, обратное рассеяние звука происходит на скоплениях внутриводной взвеси: фитопланктоне, мезозопланктоне, детрите и частицах терригенного происхождения. К сожалению, эти приборы поставляются без калибровочных данных на излучатели, и поэтому рассчитать интенсивность звукового сигнала, падающего на мелкомасштабную неоднородность в водной среде, не представляется возможным.

В работе (Ostrovskii, Zatsepin, 2011) было показано, что в акватории континентального склона северо-восточной части Черного моря вертикальная стратификация морской среды создает уникальные условия формирования звукорассеивающих слоев (на частоте 2000 кГц):

- в сероводородной зоне глубже 140–160 м звук рассеивается на частицах осаждающегося материала (в основном биогенного происхождения), потоки которых характеризуются значительной временной изменчивостью,
- в редокс-зоне и оксисклине (~50–140 м) рассеивание звука происходит как на взвешенных частицах, так и на мезозопланктоне,
- в эвфотической зоне (верхние 50 м) к этим рассеивателям звука добавляются скопления фитопланктона.

На фоне общей трехслойной структуры выделяются тонкие (толщиной порядка 1 м) звукорассеивающие слои под скачком температуры в сезонном термоклине, а также в зоне диапаузы мезозопланктона на изопикне ~15.9 единиц условной плотности (рис. 8).

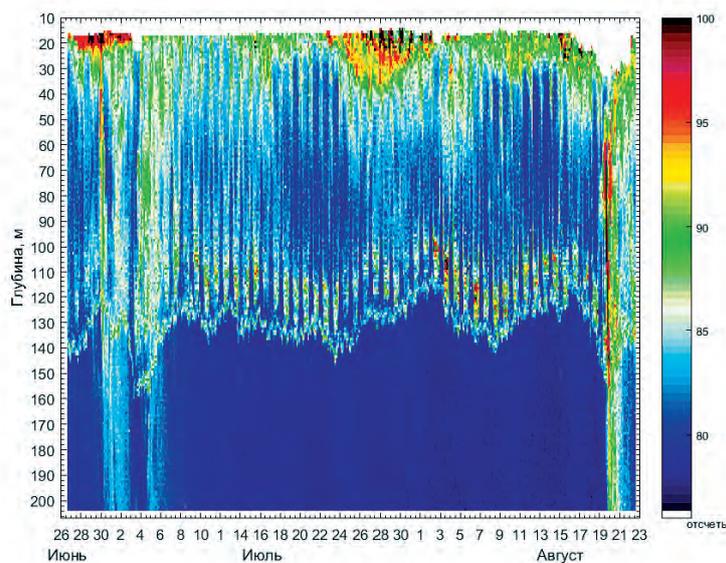


Рис. 8. Временная развертка вертикального профиля эхо-сигнала, полученного прибором Nortek Aquadopp на носителе Аквалог в районе Геленджикской бухты Черного моря летом 2011 г.

В ходе суточной миграции мезозоопланктон перемещается по вертикали на 100–120 м за 2–3 часа. Скопления мезозоопланктона наблюдаются между изопикнами 15.4 и 15.7 единиц условной плотности в дневное время, причем наблюдается межсуточная изменчивость амплитуды эхо-сигнала. Скопления начинают подъем примерно за 2 часа до заката, концентрируются на горизонтах 10–40 м между изопикнами 13 и 13.8 единиц условной плотности в ночное время и мигрируют вниз перед рассветом.

Прибор Nortek Aquadopp на носителе Аквалог с успехом использовался для изучения короткопериодной изменчивости седиментационного процесса в районе Геленджикской бухты Черного моря. В июне 2011 г. в ходе экспериментального исследования наряду со станцией Аквалог была установлена 12-стаканная седиментационная ловушка на горизонте 190 м (Клювиткин и др., 2016). Анализ осадочного материала, собранного в ловушку, показал, что облака взвеси, регистрируемые прибором Aquadopp, состоят из частиц размером 5–20 мкм. Основным продуцентом рассеянного осадочного вещества приповерхностного слоя океана является фитопланктон, чья пятнистость приводит в значительной изменчивости вертикального потока осадочного вещества. Значительное количество детрита накапливается и проваливается сквозь слой паузы мезозоопланктона, поэтому сгустки детрита дают большой вклад в создание эхо-сигнала в верхних слоях сероводородной зоны.

Еще более перспективным представляется многочастотное акустическое зондирование для оценивания размеров мелкомасштабных неоднородностей, на которых отражается и рассеивается звук. Данные об объемном рассеянии звука на различных частотах могут дать картину распределения по размерам взвешенных частиц в объеме воды, так как интенсивность рассеивания звука зависит от частоты звуковой волны, а также от количества неоднородностей в зондируемом объеме воды.



Рис. 9. Акустические излучатели прибора AQUAScat 1000s, смонтированные на фронтальной панели аппарата Аквалог над электроприводом

С этой целью на аппарате Аквалог устанавливается прибор AQUAScat 1000s (<http://www.aquatecgroup.com/aquascats/aquascats-1000s> рис. 9). AQUAScat 1000s излучает высокочастотные звуковые импульсы с помощью 4 трансдюсеров, каждый из которых работает на фиксированной частоте в диапазоне от 500 до 5000 кГц. Типичный размер неоднородностей, которые могут участвовать в создании эхо-сигналов, составляет от 40 мкм до 4 мм, а концентрация измеренного взвешенного вещества находится в пределах от 0.01 г/л до 20 г/л. Прибор AQUAScat позволяет получить профили эхо-сигналов по каждому лучу в 256 слоях толщиной 2.5–40 мм на максимальной дальности до ~10 м. Планируется использование данного прибора на носителе Аквалог для изучения цветения фитопланктона в западной части Средиземного моря.

### Перспективные разработки

Гидроакустическое оборудование уже стало неотъемлемой частью АППА. Однако потенциал этих аппаратов как носителей гидроакустического оборудования далеко не исчерпан.

На АППА может быть установлен измеритель скорости звука. Используя данные прямых измерений или рассчитывая скорость звука в воде по данным СТД-измерений, контроллер АППА может определять глубину залегания подводного звукового канала (ПЗК). Тогда регулярно сканируя водную толщу, АППА может отслеживать колебания положения ПЗК, и зависать в оси ПЗК на нужное время, при необходимости перемещаясь по вертикали.

АППА потенциально сочетает возможности мониторинга гидроакустической обстановки, проводя измерения в двух режимах: в состоянии нейтральной плавучести и в неподвижном состоянии, располагаясь попеременно на изопикнической поверхности и у морского дна. При этом на носителе перспективно применение векторно-скалярного приемника, состоящего из приемника звукового давления и градиента давления для обеспечения пространственной избирательности и повышения помехоустойчивости.

На АППА может быть интегрирована гидроакустическая система, предназначенная для позиционирования подводного аппарата с большого расстояния при взаимном расположении системы позиционирования и аппарата близком к горизонтальному. В этом случае одной из основных задач практической реализации станет разработка алгоритмов определения местоположения для систем с ультракороткой базой или длинной базой, позволяющих учитывать искривление трасс распространения сигнала вследствие вертикальной стратификации гидроакустической среды по скорости распространения звука (ультразвука). В отношении системы позиционирования с длинной базой задача разветвляется на разработку алгоритмов, основанных на двунаправленном обмене сигналами (в частности, трилатерации) и однонаправленном обмене сигналами (в частности, гиперболическом методе).

В перспективе через 5–10 лет АППА станут востребованы для выполнения задач подводной навигации автономных подводных аппаратов, а также для гидро-акустического мониторинга.

Автор выражает особую признательность А.Г. Зацепину за энергичную поддержку работ по созданию автономных подводных профилирующих аппаратов. Автор глубоко благодарен Д.А. Швоеву – главному конструктору проектов, В.А. Соловьеву – системному программисту и А.Л. Цибульскому – инженеру-электронику.

Результаты исследований, представленные во Введении и в разделах 1, 2, 3.1, 3.2, 3.3 получены в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010). Результаты исследований, представленные в разделах 3.4 и 4 получены за счет средств РНФ (проект № 14-05-0095).

### Литература

- Борейко А.А., Горнак В.Е., Мальцева С.В., Матвиенко Ю.В., Михайлов Д.Н.* Малогабаритный многофункциональный автономный необитаемый подводный аппарат «МТ-2010» // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2. С. 37–42.
- Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Павин А.М.* Реконфигурируемая система управления и навигации для многофункциональных подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1. С. 4–13.
- Клювиткин А.А., Островский А.Г., Новигатский А.Н., Лисицын А.П.* Мультидисциплинарный эксперимент по изучению короткопериодной изменчивости осадочного процесса в северо-восточной части Черного моря // Докл. РАН. 2016. Т. 469. № 3. С. 356–360. DOI: 10.7868/S0869565216210209.
- Матвиенко Ю.В., Борейко А.А., Костенко В.В., Львов О.Ю., Ваулин Ю.В.* Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1. С. 4–15.
- Муякшин С.И.* Дистанционное измерение течений в океане акустическим доплеровским методом / Л.М. Бреховских, И.Б. Андреева // Акустика океанской среды. М.: Наука, 1989. С. 120–132.
- Муякшин С.И., Селивановский Д.А.* О гидролокационном измерении течений, вызванных внутренними волнами // Океанология. 1982. Т. 22. № 6. С. 1029–1032.
- Муякшин С.И., Селивановский Д.А., Соколов А.Ю.* Акустические методы диагностики внутренних волн и газовых пузырьков в море // Проблемы акустики океана. М., Наука, 1984. С. 164.
- 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. DOI: 10.7868/S0030157413020147.
- Островский А.Г., Зацепин А.Г., Иванов В.Н., Кебкал К.Г., Низов С.С., Соловьев В.А., Тимашикевич Г.К., Цибульский А.Л., Швоев Д.А.* Заякоренная профилирующая океанская обсерватория // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2. С. 50–59.
- Brumley B.H., Deines K.L., Cabrera R.G., Terray E.A.* Broadband acoustic Doppler current

profiler: United States Patent. Patent Number 5483499. Date of Patent: Jan. 9, 1996.

*D'Spain G.L., Jenkins, S.A., Zimmerman, R., Luby, J.C., Thode, A.M.* Underwater acoustic measurements with the Liberdade/X-Ray flying wing glider // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. Vol. 117. No. 4. P. 2624. DOI: 10.1121/1.4778396.

*D'Spain G.L., Zimmerman R., Jenkins S. A., Luby J. C., Brodsky P.* Underwater acoustic measurements with a flying wing glider // *J. Acoust. Soc. Am.* 2007. Vol. 121. No. 5. P. 3107. <http://dx.doi.org/10.1121/1.4782033>.

*D'Spain G., Zimmerman R., Jenkins S. A., Rimington D. B., Luby J. C., Brodsky P.* Acoustic sensor systems on a flying wing underwater glider and two prop-driven autonomous underwater vehicles // *J. Acoust. Soc. Am.* 2008. Vol. 123. No. 5. P. 3007. <http://dx.doi.org/10.1121/1.2932590>.

*Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G.* Short-term hydrophysical and biological variability over the north-eastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // *Ocean Dynamics.* 2011. Vol. 61. P. 797–806. DOI: 10.1007/s10236-011-0400-0.

## HYDROACOUSTIC EQUIPMENT OF AUTONOMOUS UNDERWATER PROFILERS

**A.G. Ostrovskii**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36 Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail:osasha@ocean.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

Autonomous underwater profilers are designed for measurements of vertical profiles of ocean currents and marine environmental parameters. Such device moves along a vertically stretched cable at the buoy stations. Generally, a profiler comprises convenient platform for mounting of hydroacoustic equipment. A suit of sensors installed at the profiler carries out the measurements in the water column from the near-surface layer to the bottom allowing a researcher to obtain uniform data with the same accuracy. During the survey, the device usually maintains a stable orientation relative to the direction of flow, which is important for acoustic Doppler measurements of the speed and direction of ocean currents. This paper deals with applications of the moored automatic mobile profiler Aqualog for underwater communication and data transmission, acoustic measurements of the flow velocity and small-scale inhomogeneities.

**Keywords:** autonomous underwater profilers, acoustic Doppler current meter, hydroacoustic beacon, sound backscatter, hydroacoustic modem

### References

*Borejko A.A., Gornak V.E., Mal'tseva S.V., Matvienko Yu.V., and Mikhajlov D.N.* Malogabaritnyj mnogofunktsional'nyj avtonomnyj neobitaemyj podvodnyj apparat «MT-2010» (Compact multifunctional autonomous underwater vehicle MT-2010). *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika (Underwater investigation and robotics)*, 2011, No. 2, pp. 37–42.

*Brumley B.H., Deines K.L., Cabrera R.G., and Terray E.A.* Broadband acoustic Doppler current profiler. United States Patent. Patent Number 5483499. Date of Patent Jan. 9, 1996.

- D'Spain G.L., Jenkins S.A., Zimmerman R., Luby J.C., and Thode A.M. Underwater acoustic measurements with the Liberdade/X-Ray flying wing glider, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, Vol. 117, No. 4, p. 2624, doi: 10.1121/1.4778396.
- D'Spain G.L., Zimmerman R., Jenkins S. A., Luby J. C., and Brodsky P. Underwater acoustic measurements with a flying wing glider, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007, Vol. 121, No. 5, p. 3107, doi: 10.1121/1.4782033.
- D'Spain G., Zimmerman R., Jenkins S. A., Rimington D. B., Luby J. C., and Brodsky P. Acoustic sensor systems on a flying wing underwater glider and two prop-driven autonomous underwater vehicles, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, Vol. 123, No. 5, p. 3007, <http://dx.doi.org/10.1121/1.2932590>.
- Klyuvitkin A.A., Ostrovskii A.G., Novigatskii A.N., and Lisitzin A.P. Multidisciplinary experiment on studying short-period variability of the sedimentary process in the northeastern part of the Black Sea, *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 469, Part 1, pp. 771–775, doi: 10.1134/S1028334X16070230.
- Matvienko Yu.V., Borejko A.A., Kostenko V.V., L'vov O.Yu., and Vaulin Yu.V. Kompleks robototekhnicheskikh sredstv dlya vypolneniya poiskovykh rabot i obsledovaniya podvodnoj infrastruktury na shel'fe (System of robotic tools to perform search and surveillance on underwater infrastructure at the sea shelf), *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika (Underwater investigation and robotics)*, 2015, No. 1, pp. 4–15.
- Muyakshin S.I. Distantionnoe izmerenie techenij v okeane akusticheskim doplerovskim metodom (Remote sensing of the currents in the ocean by using the acoustic Doppler method), In: *Akustika okeanskoj sredy (Acoustics of the ocean media)*. Moscow: Nauka, 1989, pp. 120–132.
- Muyakshin S.I. and Selivanovskij D.A. O gidrolokatsionnom izmerenii techenij, vyzvannykh vnutrennimi volnami (On sonar measurements of the currents generated by internal waves), *Okeanologiya*, 1982, Vol. 22, No. 6, pp. 1029–1032.
- Muyakshin S.I., Selivanovskij D.A., and Sokolov A.Yu. Akusticheskie metody diagnostiki vnutrennikh voln i gazovykh puzyr'kov v more (Acoustic methods for diagnostics of internal waves and gas bubbles in the sea), In: *Problemy akustiki okeana (Problems of the Ocean Acoustics)*, Moscow: Nauka, 1984, p. 164.
- Ostrovskii A.G. and Zatsepin A.G. Short-term hydrophysical and biological variability over the north-eastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys, *Ocean Dynamics*, 2011, Vol. 61, pp. 797–806, doi: 10.1007/s10236-011-0400-0.
- Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Soloviev V.A., Tsibul'skij A.L., and 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, doi: 10.1134/S0001437013020124.
- Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Ivanov V.N., Kebkal K.G., Nizov S.S., Solov'ev V.A., Timashkevich G.K., Tsibul'skij A.L., and Shvoev D.A. Zayakorennaya profiliruyushhaya okeanskaya observatoriya (Moored profiling ocean observatory), *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika (Underwater investigation and robotics)*, 2009, No. 2, pp. 50–59.
- Vaulin Yu.V., Inzartsev A.V., L'vov O.Yu., Matvienko Yu.V., and Pavin A.M. Rekonfiguriruemaya sistema upravleniya i navigatsii dlya mnogofunktsional'nykh podvodnykh robotov (Configurable system for control and navigation of multifunctional underwater robots), *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika (Underwater investigation and robotics)*, 2017, No. 1, pp. 4–13.

## **ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ НА КАВКАЗСКОМ И КРЫМСКОМ ШЕЛЬФАХ ЧЕРНОГО МОРЯ (ПО ЛЕТНЕ-ОСЕННИМ НАБЛЮДЕНИЯМ 2011–2016 ГГ.)**

**Е.Е. Химченко<sup>1</sup>, А.Н. Серебряный<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Россия  
e-mail: ekhym@ocean.ru*

<sup>2</sup> *АО «Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева», 117036, Москва, Россия  
e-mail: serebryany@hotmail.com*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Анализируются и обобщаются результаты наблюдений за внутренними волнами на крымском и кавказском шельфах Черного моря, проведенных в период с 2011 по 2016 гг. Измерения велись на заякоренных станциях, оснащенных цепочками автономных датчиков температуры, а также при помощи вертикального профилирования водной толщи зондом miniSVP и доплеровским акустическим профилометром течений (ADCP). Проводится сравнение наблюдаемых внутренних волн для трех типов шельфа – полого (геленджикский шельф), приглубого (шельф ЮБК) и с резким свалом глубин (абхазский шельф). Наблюдения в течение нескольких летних сезонов в период 2011–2016 гг. на шельфе Черного моря подтверждают почти постоянное присутствие внутренних квазиинерционных колебаний термоклина, достаточно часто регистрируются короткопериодные внутренние волны с периодами от единиц до десятков минут. На черноморском шельфе преобладают внутренние волны низшей моды, но встречаются также волны 2-ой моды. На шельфе с резким свалом глубин отмечается наличие внутренних волн максимальных высот. Представлены примеры зарегистрированных инерционных и короткопериодных внутренних волн. Приводятся частотные спектры внутренних волн, а также статистика встречаемости и оценка перемежаемости инерционных и короткопериодных внутренних волн для трех районов шельфа.

**Ключевые слова:** инерционные внутренние волны, короткопериодные внутренние волны, внутренние волны 2-ой моды, Черное море, шельф Крыма и Кавказа

### **Введение**

Внутренние волны широко распространены в Мировом океане, в шельфовой зоне наиболее часто основным механизмом их генерации является взаимодействие приливных течений (баротропного прилива) с неоднородностями рельефа дна, при этом возникают внутренние приливные волны высотами в несколько десятков, а в отдельных случаях и сотен метров (Морозов, 1985; Morozov, 2018). Другими интенсивными видами мезомасштабной изменчивости в океане являются инерционные движения, период которых изменяется в зависимости от географической широты места. Инерционные движения достаточно хорошо идентифицируются на частотных спектрах внутренних волн как четкий пик близкий к локальной инерционной частоте и являются наиболее энергетической частью спектра внутренних волн (Коняев, Сабинин, 1982). Черное море, будучи замкнутым бассейном, не имеет значимых приливов, что позволяет наблюдать механизмы генерации внутренних волн, отличные от приливного (Серебряный, Иванов, 2013). Следует заметить, что

в среднем приливы в Черном море составляют порядка нескольких сантиметров (Медведев, Архипкин, 2016). Однако до сих пор не сообщалось об отмеченных в наблюдениях в Черном море как самих приливных внутренних волн, так и короткопериодных, появляющихся с приливной периодичностью. В работах (Иванов, Серебряный, 1982; Серебряный, 1985) путем сравнения спектров внутренних волн Черного моря с модельным спектром Гарретта-Манка, было показано, что внутренние волны здесь менее интенсивны, чем их аналоги в океане или приливных морях. Тем не менее, внутренние волны в Черном море широко распространены и оказывают значительное влияние на динамику вод моря. Исследования внутренних волн на шельфе Черного моря проводятся более 50-ти лет. Вкратце упомянем полученные за это время наиболее значимые результаты. Первые наблюдения инерционных внутренних волн на шельфе Черного моря были опубликованы в (Ямпольский, 1960). В этой статье проанализированы данные, полученные на многосуточной якорной станции летом 1956 г на шельфе Абхазии. Первые измерения внутренних волн заякоренными термисторными цепочкам, проведенными на геленджикском шельфе, а также измеренные частотные спектры представлены в работе (Иванов и др., 1969). Первые наблюдения внутренних волн распределенными датчиками температуры, а также выделение цугового характера волн были описаны в (Коняев, Сабинин, 1973). Доказательное сопоставление измеренных частотных спектров со спектром Гарретта-Манка, показавшее на относительно малый уровень энергии внутренних волн Черного моря, было дано в работе (Иванов, Серебряный, 1982). Первые измерения пространственных спектров внутренних волн, обнаружение генерации внутренних волн проходящей интрузией распресненных вод приводится в (Иванов, Серебряный, 1983). Наблюдение механизмов генерации интенсивных солитоноподобных волн, подходящими в прибрежную зону внутренними инерционными волнами и локальными фронтами стонно-нагонного происхождения, было описано в (Иванов, Серебряный, 1985). Обзор наблюдений внутренних волн с океанографической платформы МГИ за 30 лет приведен в (Серебряный, Иванов, 2013). В настоящее время благодаря внедрению новой океанологической техники появляются возможности более детально исследовать физические явления морской среды. В частности, наличие доплеровских акустических профилометров течений (ADCP), портативных STD зондов, автономных управляемых аппаратов, а также доступность космических изображений поверхности моря (Лаврова и др. 2013), в том числе повышенного разрешения, позволяет продвинуться в понимании природы внутренних волн и их свойств.

Данная работа является продолжением более ранней статьи (Серебряный, Химченко, 2014), где приводилось первое сравнение наблюдаемых внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря в 2013 г. В настоящей статье мы охватываем более широкий объем материала (наблюдения с 2011 по 2016 гг) и даем обобщение результатов этих наблюдений. Измерения велись в трех районах: на шельфе в окрестностях г. Геленджик, на шельфе Абхазии около г. Сухум и на шельфе ЮБК близ п. Кацивели. В последних двух районах проводились длительные исследования со стационарных платформ – эстакады Гидрофизического института

АН Абхазии (ГИАНА) и платформы Морского Гидрофизического Института РАН (МГИ РАН).

### Методика измерений и используемое оборудование

В течение нескольких летних сезонов мы проводили наблюдения за внутренними волнами в шельфовой зоне Черного моря, используя заякоренные вертикальные гирлянды из автономных датчиков температуры DST-centi фирмы «Starr-Oddi». В качестве верхнего датчика гирлянды применялся датчик DST-centi-TD, регистрирующий помимо температуры также и глубину. В отдельных случаях дополнительный датчик давления крепился на нижнем конце гирлянды. Эти типы датчиков широко применяются для исследований внутренних волн на шельфах в различных регионах Мирового Океана. Устанавливалась дискретность измерений 30 с (точность датчиков 0,1°C, постоянная времени 20 с, погрешность измерения глубины 0,6%). В работе анализировались внутренние волны с наблюдаемой высотой не менее 0,5 м, при этом значения флуктуации температуры составляли не менее 0,5°C. Термогирлянды, установленные с платформ, крепились к ним, а также с помощью груза на дне (мертвого якоря), что исключало их выведение течением из вертикального положения. Термогирлянды, установленные на геленджикском и абхазском шельфах, в своих верхних горизонтах имели датчики температуры и глубины, что позволяло при обработке проследить за их заглублением и исключать периоды, когда имело место сильное отклонение гирлянды от вертикали. В анализируемых в данной статье реализациях смещения датчика глубины по вертикали были незначительными и не превышали 10 см. Продолжительность работы термогирлянд варьировалась от недели до нескольких месяцев. Также проводились измерения со стационарных оснований, где велись наблюдения за изменчивостью вертикальных профилей температуры и скорости звука путем долговременных ежечасных зондирований зондом miniSVP. Велись длительные измерения течений установленным на неподвижном основании ADCP «Rio Grande 600 kHz». Кроме того велись исследования течений и внутренних волн с малого судна, оснащенного ADCP, на пространственных разрезах в пределах шельфов всех трех вышеуказанных районов Черного моря. Работа на стационарных платформах позволяет проводить измерения непрерывно в фиксированной точке акватории вне зависимости от погодных условий. Все эксперименты были выполнены по единой методике, что позволяет сопоставлять данные, полученные в различных точках наблюдений.

Морская платформа МГИ РАН расположена на шельфе Черного моря у п. Кацивели Южного берега Крыма. Платформа находится на расстоянии 600 м от берега, где глубина моря составляет 29 м. В работе представлен материал, полученный в результате наблюдений в летние сезоны 2011, 2013 и 2014 гг.

Эстакада ГИАНА расположена у м. Сухумский (г. Сухум, Абхазия) на юго-восточном шельфе Черного моря и соединена с берегом. Глубина в районе наблюдений составляет 13 м. Измерения на шельфе Абхазии проводились в летне-осенние сезоны 2013–2016 гг. В отдельные годы на абхазском шельфе также устанавливались системы из нескольких (2–3) заякоренных цепочек мористее платформы.

На северо-восточном шельфе наблюдения велись на базе ЮО ИОРАН вблизи г. Геленджик и залива Голубая бухта в мае – июне 2013 г. На геленджикском шельфе устанавливалась закоренная станция с цепочкой термисторов на глубине 35 м.

В наблюдаемых районах исследований морфологические особенности шельфа принадлежат разным типам геоморфологического районирования (Гончаров и др., 1972). Так, шельф ЮБК принадлежит Центральному Крымскому типу, геленджикский шельф относится к Западно-Кавказскому типу, а шельфовая зона Сухума принадлежит Восточно-Кавказскому типу. На рис. 1 представлены профили рельефа дна для каждого района наблюдений, а также типичные вертикальные профили температуры. Шельф Черного моря в районе Геленджика является преимущественно неглубоким, в месте работ увеличение глубины моря по мере отдаления от берега происходит постепенно, шельф пологий. Крымский шельф характеризуется относительно небольшим наклоном дна, составляющим всего несколько минут. Переход шельфа к материковому склону происходит постепенно. Однако, в районе платформы МГИ РАН отмечается несколько более резкое увеличение глубин, поэтому шельф этого района можно характеризовать как приглубый.

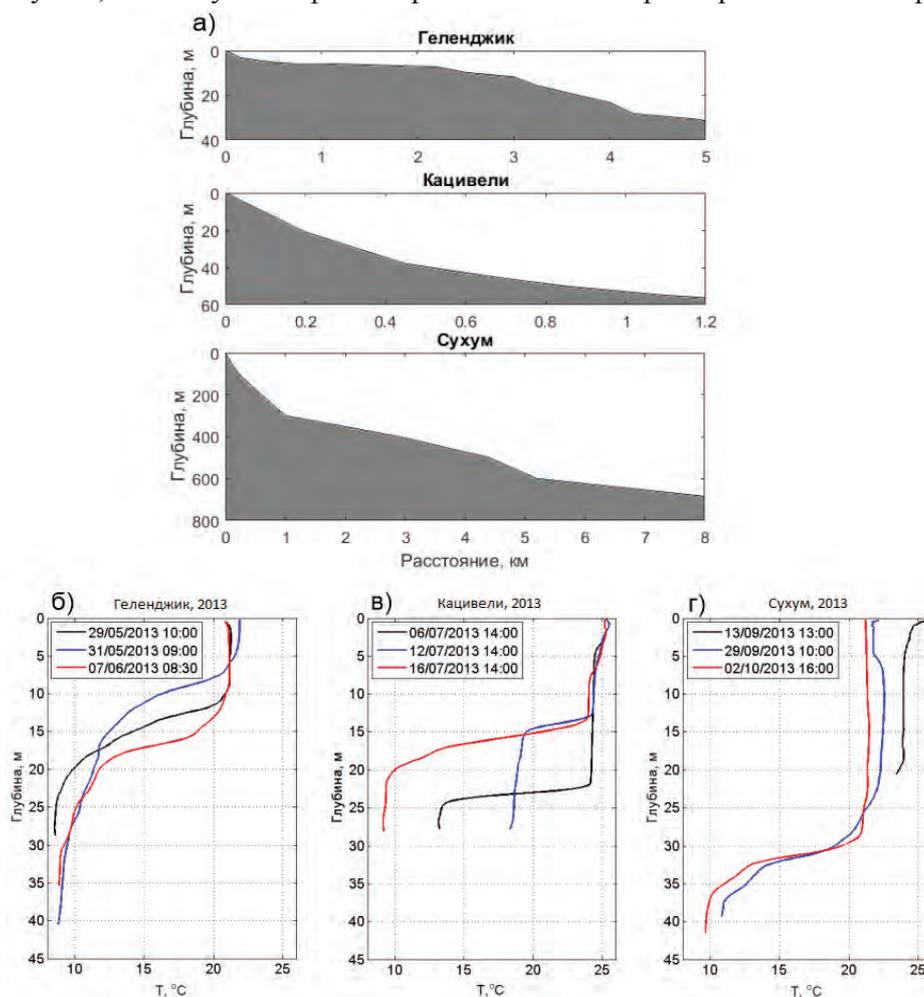


Рис. 1. Профили рельефа дна в районах исследований (1а). Вертикальные профили температуры для Геленджика (1б) Кацивели (1в) и Сухума (1г), выполненные по данным зондирований в 2013 г.

Шельф у берегов Сухума узкий и крутой с резким свалом глубин, глубины около 100 м наблюдаются там на удалении всего нескольких сотен метров.

### Наблюдения квазиинерционных внутренних волн

В исследуемых районах локальный инерционный период изменяется в пределах 17,1–17,6 ч (см. табл. 1). В каждом районе наблюдений были зарегистрированы квазиинерционные внутренние волны с периодом близким к локальному инерционному.

Таблица 1. Периоды инерционных колебаний для районов наблюдений

Место наблюдений	Широта (с. ш.)	Локальный инерционный период, ч	Наблюдаемый период на частотном спектре, ч
Платформа МГИ РАН	44,39	17,15	17,07
Эстакада ГИАНА	42,98	17,60	18,21
Заякоренная станция на геленджикском шельфе	44,57	17,10	15,17

#### *Квазиинерционные внутренние волны на геленджикском шельфе (пологий шельф)*

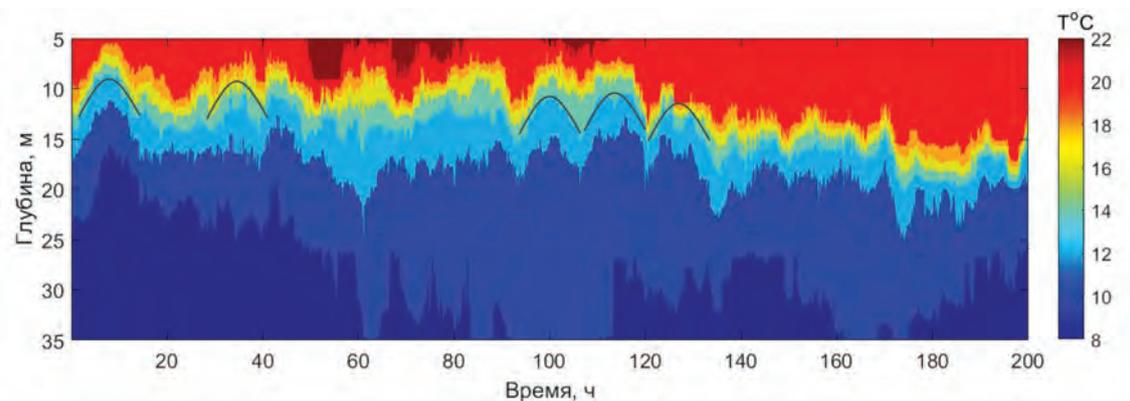


Рис. 2. Временная изменчивость температурной структуры моря на геленджикском шельфе с 29 мая (11:00) по 7 июня (9:00) 2013 г. Видны 17-часовые колебания термоклина, обусловленные инерционными волнами (выделены тонкими линиями)

На рис. 2 представлена запись изменчивости температурной структуры водной толщи по данным термисторной цепочки на геленджикском шельфе с 29 мая по 7 июня 2013 г. Отмечаются значительные колебания термоклина по глубине с максимальным размахом до 8 м. В начале измерений среднее положение термоклина находилось на горизонте 7 м, затем оно постепенно заглубилось и к концу наблюдений оказалось на глубине 15 м. В первой половине наблюдений просматриваются почти регулярные колебания с периодом близким к 17 часам, вызванные проходящими по шельфу квазиинерционными внутренними волнами с высотами 5–6 м.

#### *Квазиинерционные внутренние волны на крымском шельфе (приглубый шельф)*

В данном районе квазиинерционные внутренние волны с периодом близким к локальному инерционному присутствуют почти постоянно. Высоты наблюдаемых

волн варьируют от 5 до 10 м, иногда достигая 15 м. В качестве примера представлена временная развертка изменений температуры и вертикальные профили температуры при прохождении внутренних волн 11–12 июля 2011 г. (рис. 3 а, б).

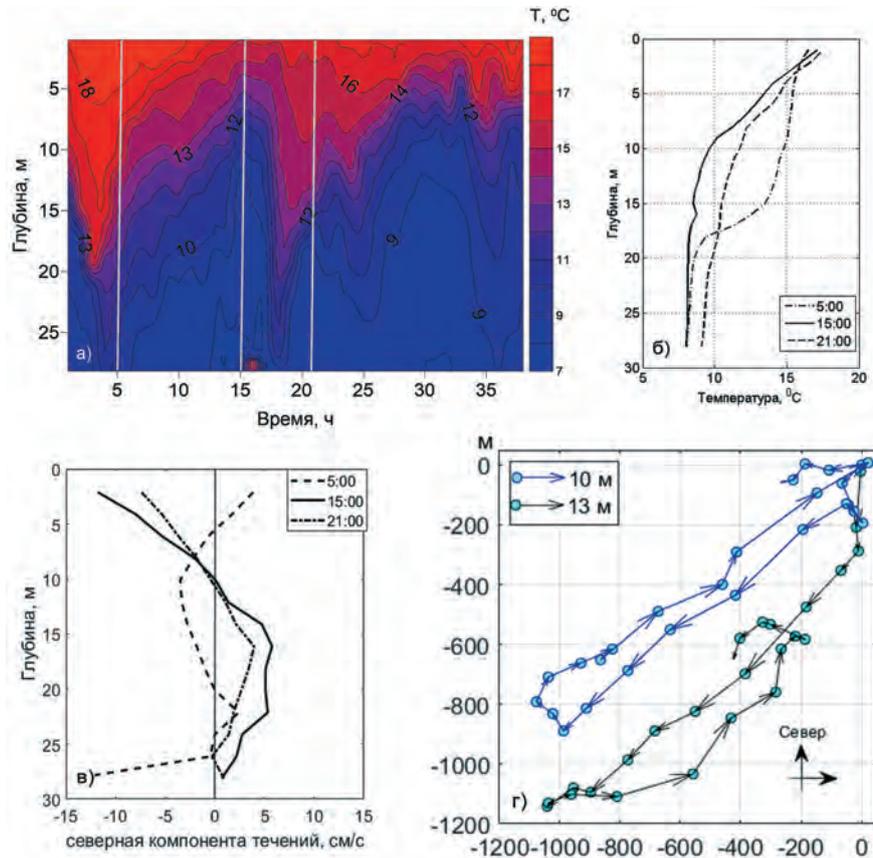


Рис. 3. Проявление внутренних волн инерционного периода 1-ой моды 11–12 июля 2011 г. Дополнительно представлены профили температуры (б), и северной компоненты скорости течений (в), выполненные в конкретные часы (отмечены вертикальными линиями на разрезе), а также прогрессивная векторная диаграмма течений (г) по измерениям ADCP за период с 00:00 ч по 21:00 ч 11 июля 2011 г. (показана для горизонтов 10 м и 13 м). Кружки отмечают часы, начало диаграммы в точке (0,0). По осям отложены смещения в м.

Дополнительно изображены вертикальные профили меридиональной (северной) компоненты скорости течения и прогрессивная векторная диаграмма течений за период прохождения волны (рис. 3 в, г). На записи с 2 ч 11 июля произошел резкий подъем термоклина, а после 17 ч заглубление, при этом значения температуры на горизонтах изменились в пределах 5–7°C. Подобные синхронные смещения термоклина по всей толще моря были вызваны прохождением инерционных внутренних волн 1-ой моды. На вертикальных профилях скорости течения видно, что во время прохождения внутренней волны в области слоя скачка температуры происходит смена направления течения на противоположное, что характерно для внутренних волн. На рис. 3 г показана прогрессивная векторная диаграмма течений на горизонтах 10 м и 13 м. Видно, что на горизонте 10 м за инерционный период происходит поворот по часовой стрелке, а всего через 3 м на горизонте 13 м вектор

течений снова совершает оборот против часовой стрелки, что аномально для инерционных внутренних волн, наблюдаемых в северном полушарии. Такое нетипичное поведение эллипсов инерционных течений заслуживает дополнительного внимания. Оно уже отмечалось ранее в наблюдениях на шельфе океана (Бондур и др., 2013), а также на геленджикском шельфе Черного моря (Бондур и др., 2017). В работе (Бондур и др., 2017) также отмечается смена знака вращения по глубине, которую авторы связывают с резкой временной изменчивостью градиентов течений вокруг измерителя. Такое нехарактерное поведение эллипсов инерционных течений объясняется суперпозицией инерционных колебаний и фонового сдвигового течения, что вместе с близостью берега привносит дополнительное искажение. Данная гипотеза была недавно проверена и подтверждена аналитически в работе (Сабинин, Коротаев, 2017), где рассматривалось взаимодействие инерционных колебаний и однородного течения однородной жидкости, скорость которой изменяется линейно. Также было найдено решение взаимодействия инерционных движений с фоновым течением одного направления и произвольным профилем скорости (Коротаев, Сабинин, 2017). Кроме того, полученное в этих работах решение показывает существование разнообразных форм годографов инерционных колебаний (от овала до полумесяца), а также дает объяснение существования аномального вращения этих годографов (Коротаев, 2018).

В последние годы активно обсуждается информация о наблюдении внутренних волн 2-ой моды в океане (Konyaev et al 1995; Yang et al, 2009; Shroyer et al, 2010; Serebryanu, 2018). Большинство наблюдаемых случаев относятся к внутренним солитоноподобным волнам, происхождение которых связано с трансформацией баротропного прилива на неровном дне. В работе (Mayer, 1981) представлены данные о наблюдении внутренних инерционных волн 2-ой моды после прохождения урагана. Ряд работ посвящен наблюдениям внутренних волн 2-ой моды в лабораторных экспериментах (например, Carr et al, 2015; Deerpwell et al, 2017), а также по результатам численного моделирования (например, Yang et al, 2010; Yuan et al, 2018).

Появление внутренних волн 2-ой моды отмечается вблизи подводных поднятий в океане. Отражаясь на дне и поверхности, наклонные волны образуют систему волн, стоячих по вертикали и бегущих по горизонтали (Baines, 1982). Основным источником генерации внутренних колебаний обычно расположен примерно в самой высокой точке континентального склона, на границе шельфа или вверху подводных хребтов, или подводных гор (Mogozov, 2018). Интенсивность генерируемых колебаний возрастает, если глубина резких вертикальных градиентов температуры и плотности в сезонном пикноклине близка к точке резкого увеличения глубины. При интенсивной генерации должны присутствовать более высокие моды внутренних волн (Мельников, 1982). Океанографическая платформа МГИ располагается в начале резкого склона шельфа, от которого начинается граница материкового склона, что вероятно приводит к появлению в данном районе внутренних волн 2-ой моды. Другие возможные механизмы генерации волн второй моды, например обтекание

препятствий низкочастотными течениями с образованием запрепятственных волн (Иванов и др., 1977).

Во время измерений на ЮБК с платформы МГИ в июле 2011 г нами были зарегистрированы квазиинерционные внутренние волны 2-ой моды. В наблюдениях колебаний термоклина были идентифицированы волны «растяжения», когда верхние и нижние слои водной толщи направлены в противоположные стороны относительно друг друга. В первые несколько дней до появления волн 2-ой моды термоклин совершал синхронные колебания по всей толще моря с периодом близким к 17 ч, т.е. наблюдались внутренние инерционные волны 1-ой моды. Среднее положение термоклина при этом было расположено ближе к поверхности, чем ко дну. В течение нескольких суток среднее положение термоклина постепенно заглублялось. Когда 14 июля его положение оказалось ближе ко дну характер смещений термоклина с инерционным периодом кардинально изменился. Были зарегистрированы колебания слоев толщи в противофазе, что является характерным признаком внутренних волн 2-ой моды. На рис. 4 а, б представлены температурные колебания водной толщи и вертикальные профили температуры во время наблюдения инерционной внутренней волны 2-ой моды.

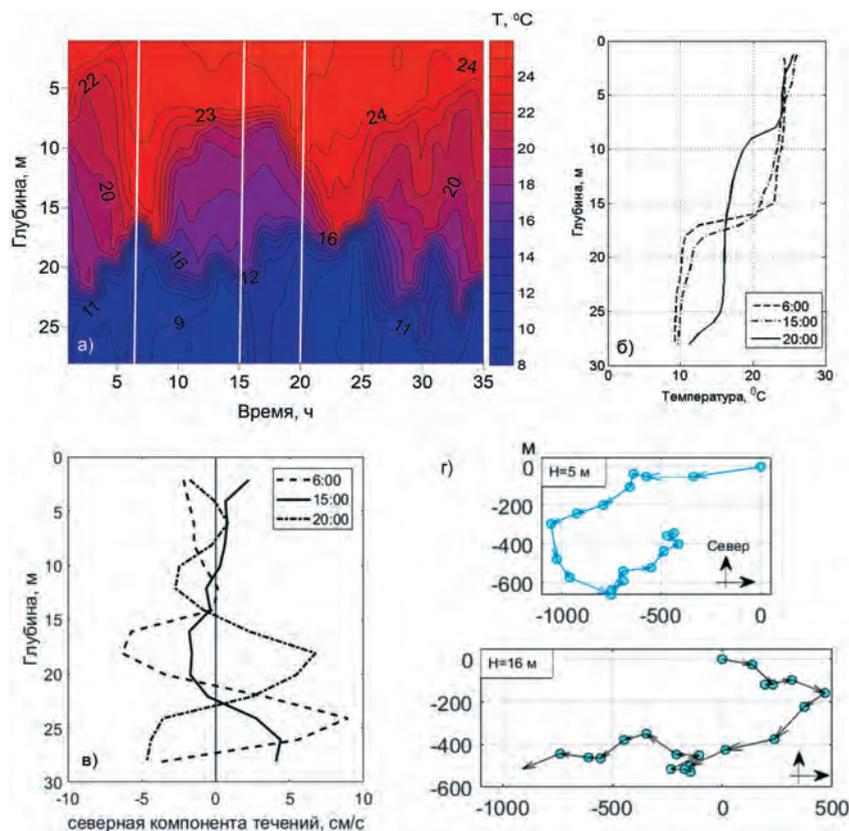


Рис. 4. Проявление внутренней волны квазиинерционного периода 2-ой моды 16–17 июля 2011 г. Дополнительно представлены профили температуры (б), северной компоненты скорости течений (в), выполненные в конкретные часы (отмечены вертикальными линиями на разрезе), а также прогрессивная векторная диаграмма течений (г) по измерениям ADCP за период с 06:00 ч 16 июля по 01:00 ч 17 июля 2011 г. (показана для горизонтов 5 м и 16 м). Кружки отмечают часы, начало диаграммы в точке (0,0).

По осям отложены смещения в м.

Также продемонстрированы вертикальные профили меридиональной компоненты скорости течения и прогрессивная векторная диаграмма течений (рис. 4 в, г). Из рисунка видно, как за 16-часовой период верхние водные слои поднимаются с глубины 16 м на глубину 7–8 м, после чего вновь занимают исходное положение. Одновременно с этим слои нижней половины водной толщи заглубляются от 16 м на глубину до 21 м. Подобные движения относятся к внутренним волнам 2-ой моды типа «растяжения». Амплитуда этих волн достигала 7 м. На соответствующих вертикальных профилях скорости течения отмечается, что во время прохода внутренней волны 2-ой моды наблюдается дважды смена противоположной направленности течения по глубине. При этом на профилях скорости течения максимумы наблюдаются в 6 ч и 20 ч. Как и в случае с внутренними волнами 1-ой моды, вектор скорости течений претерпевает значительные изменения. В последующих измерениях в 2013 г. в районе ЮБК нам также удалось зарегистрировать квазиинерционные внутренние волны 2-ой моды, однако, менее интенсивные (Серебряный, Химченко, 2014).

#### *Квазиинерционные внутренние волны на абхазском шельфе (узкий шельф)*

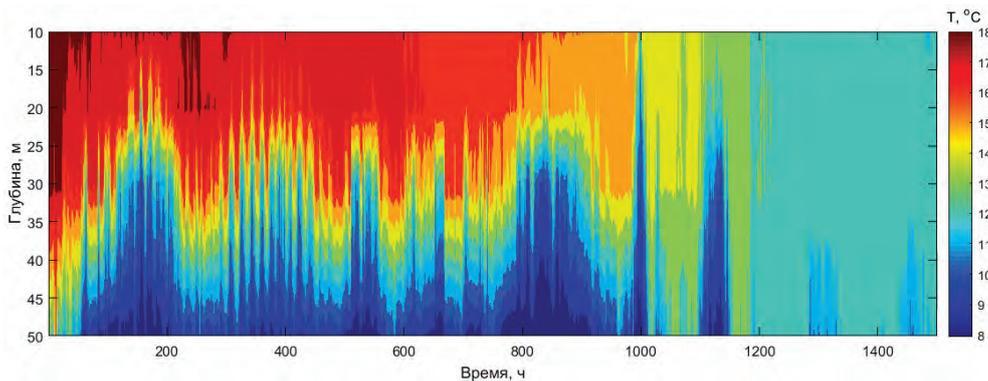


Рис. 5. Изменчивость температурной структуры моря во времени по данным термисторов на абхазском шельфе с 23 октября по 25 декабря 2013 г.

На рис. 5 представлена изменчивость температурной структуры моря во времени по данным цепочки автономных датчиков температуры, установленной на глубине 50 м за период наблюдений с 23 октября по 25 декабря 2013 г. напротив эстакады ГИАНА у м. Сухумский. Интенсивные квазиинерционные колебания наблюдались в начале измерений в октябре, когда термоклин располагался на глубине около 30–35 м. Во время прохождения инерционных внутренних волн наблюдаются вертикальные смещения термоклина размахом до 20–25 м. Характер колебаний температуры заметно изменился к концу осени – началу зимы, что связано было с охлаждением всего водного столба и заглублением термоклина. При этом инерционные движения в колебаниях температуры в декабре стали малозаметны.

#### *Сравнение инерционных внутренних волн на трех типах шельфа*

Для каждого района наблюдений характерно наличие внутренних инерционных волн, однако их высоты заметно отличаются. Так на геленджикском шельфе высоты внутренних волн составляют в среднем не более 5–7 м, на крымском шельфе

высоты волн достигают 10–12 м, а на абхазском шельфе – 15–20 м. За все время наблюдений в районе Абхазии были зарегистрированы интенсивные инерционные внутренние волны, которые по сравнению с другими шельфовыми районами Черного моря, имели максимальные высоты (до 25 м), что обусловлено узким шельфом и близостью глубокой воды. Для каждого района наблюдений была оценена временная перемежаемость внутреннего волнения как отношение времени существования инерционных колебаний к общему времени наблюдения. На примере наблюдений в 2013 г. временная перемежаемость внутренних инерционных волн на шельфе Абхазии составила 53%, на крымском шельфе – 65 %, а на геленджикском шельфе – 40%. Квазиинерционные внутренние волны 2-ой моды были зарегистрированы только на крымском шельфе. Ко 2-ой моде относятся 28% и 20% квазиинерционных внутренних волн, наблюдавшихся на крымском шельфе в 2011 и 2013 гг. соответственно.

На рис. 6 представлены частотные спектры внутренних волн для трех типов шельфа, построенные по данным проведенных измерений. Расчет частотных спектров в диапазоне низких частот велся по данным вертикальных смещений термоклина следующим образом. Предварительно перед расчетом был удален тренд.

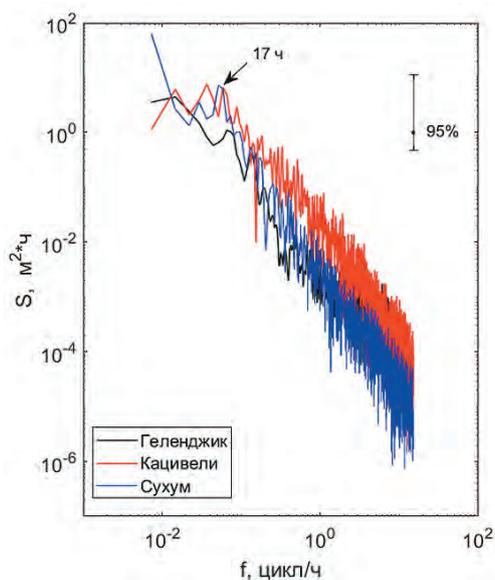


Рис. 6. Частотные спектры внутренних волн для разных типов шельфа

Дискретность измерений была усреднена до 2 мин. Выполнялся расчет по рядам длиной почти 10 суток для каждого района, расчет велся по отрезкам длиной 4096 отсчетов, со сдвигом в 2048 отсчетов. На крымском и абхазском шельфе уровень энергии наблюдаемых внутренних волн почти на порядок выше по сравнению с волнами на геленджикском шельфе. Вероятно, такая особенность обусловлена тем, что в районе Геленджика измерения велись в начале летнего сезона, в то время как на крымском и абхазском шельфах наблюдения проводились в летнее и осеннее время. Также для районов крымского и геленджикского шельфов отмечается сдвиг инерционного пика в высокочастотный диапазон, а для абхазского шельфа – в более низкочастотный. Подобное отклонение частоты наблюдаемых инерционных колебаний от локальной инерционной в прибрежной зоне встречалось ранее неоднократно

(Блатов и др., 1984; Коняев, Сабинин, 1992) и объясняется большей неоднородностью поля плотности в шельфовой зоне по сравнению с мористой частью.

### Наблюдения короткопериодных внутренних волн на шельфе Черного моря

На всех типах шельфа было отмечено почти постоянное присутствие на термоклине короткопериодных внутренних волн (фоновые колебания), а также эпизодическое появление интенсивных внутренних волн. Периоды короткопериодных внутренних волн для Черного моря, как известно, составляют от нескольких минут до десятков минут, длины – от десятков до нескольких сотен метров, а амплитуды в среднем порядка нескольких метров (Иванов, Серебряный, 1985; Серебряный, Иванов, 2013).

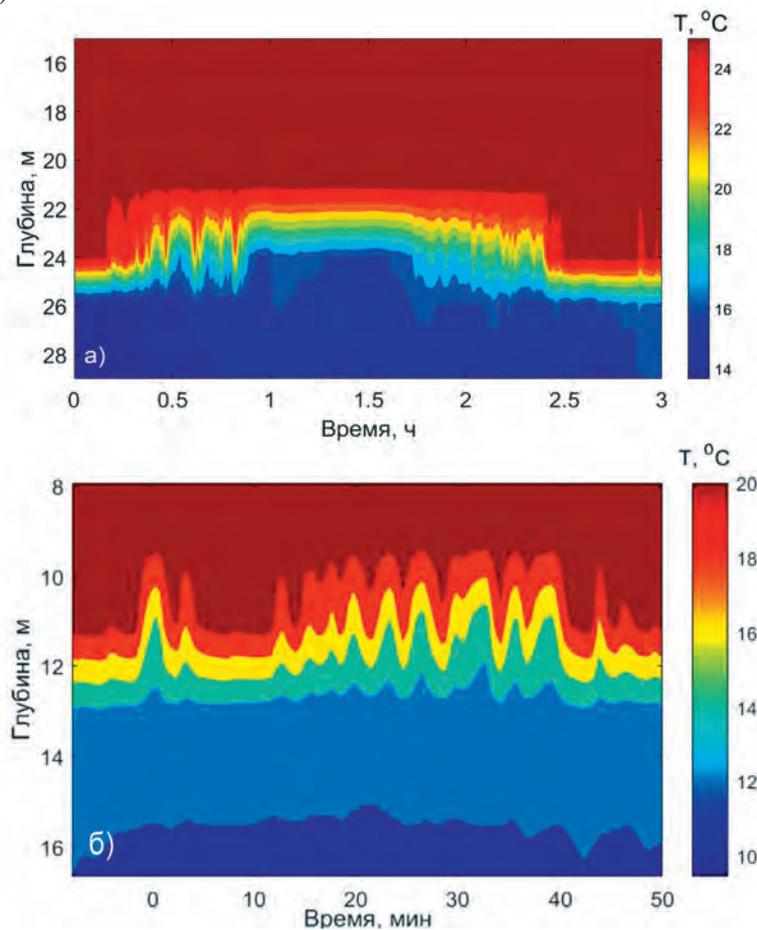


Рис. 7. Запись термисторов на крымском шельфе 22 июля 2014 г. (а). Цуг внутренних волн-возвышений на геленджикском шельфе 3 июня 2013 г. (б)

Рассмотрим примеры короткопериодных волн, зарегистрированных термокасами на крымском и геленджикском шельфах. На рис. 7а изображен участок записи длиной 3 ч из наблюдений с платформы МГИ в июле 2014 г. В начале записи виден цуг из 6-ти волн (высота волн 2–3 м, период 10 мин), потом колебания прекратились, спустя еще час снова появился цуг из 5 менее интенсивных волн (высота волн 1–2 м, период 6 мин). Предположительно цуги короткопериодных волн двигались на берег. По ранее проведенным детальным измерениям пространственных

спектров короткопериодных волн данного района было установлено, что здесь береговая направленность цугов внутренних волн является преобладающей (Иванов, Серебряный, 1985).

На рис. 7б приведен пример цуга короткопериодных внутренних волн, зарегистрированный в июне 2013 г. на геленджикском шельфе. На записи сначала зарегистрирована уединенная волна-предвестник высотой 2 м и с временным масштабом в 4 мин, а спустя 15 мин появился выраженный цуг из десяти короткопериодных внутренних волн-возвышений (период волн 3–5 мин, высота 1–2 м). Особенностью цуга было «обратное» ранжирование волн по высотам – цуг начинался с волн малых амплитуд с постепенным переходом на волны с возрастающими амплитудами.

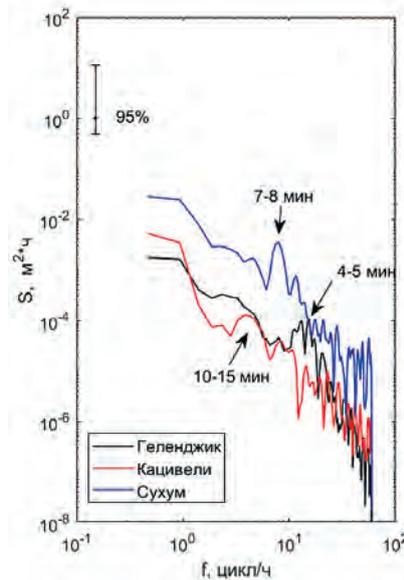


Рис. 8. Частотные спектры короткопериодных внутренних волн для разных типов шельфа

Зная глубину постановки станции и горизонт расположения каждого отдельного датчика температуры, данные термисторов путем осреднения приводились к «смоделированному» распределенному датчику, а затем полученный результат делился на известный вертикальный градиент температуры. Таким образом данные термисторов были переведены в вертикальные смещения термоклина. Впоследствии для каждого района исследований был рассчитан частотный спектр вертикальных смещений термоклина в высокочастотном диапазоне. Для расчета спектров выбирались записи, где есть цуги волн. Дискретность измерений 30 сек. Длина каждого расчетного ряда составила 3 часа. Расчет велся по отрезкам длиной 30 мин со сдвигом в 15 мин. На рис. 8 представлены частотные спектры для описанных выше примеров короткопериодных внутренних волн. Проведенный спектральный анализ выявил пики высокочастотных колебаний, соответствующие периодам 4–5 мин на геленджикском шельфе, 7–8 мин для абхазского и 10–15 мин для крымского шельфа (см. рис. 8). Такие периоды типичны для короткопериодных внутренних волн Черного моря. Также по аналогии с инерционными колебаниями была проведена оценка временной перемежаемости короткопериодных внутренних волн для трех типов шельфа. На крымском шельфе временная перемежаемость

короткопериодных внутренних волн составила 9,35% в 2014 г., из них 2-ая мода составила 32%. Для абхазского шельфа перемежаемость составила 11%, из них 2-ая мода 6% (2016 г.). На геленджикском шельфе временная перемежаемость короткопериодных внутренних волн достигла 20%.

На шельфах океанов и морей часто встречаются внутренние боры – сильно-нелинейные волны, представляющие собой последнюю стадию трансформации внутренней приливной или инерционной волны перед их разрушением (Иванов, Коняев, 1976; Иванов и др., 1981; Holloway, 1987; Серебряный, 1990; Серебряный, 1993; Noble et.al, 2009; Walter and Phelan, 2016). В бесприливном Черном море также регистрируются внутренние боры (например, Иванов и др., 2006), но здесь они образуются в основном благодаря стонно-нагонным процессам или проходящим по шельфу инерционным волнам. При измерениях с океанографической платформы в прибрежной зоне Черного моря в июле 2013 г. был зарегистрирован внутренний бор (Серебряный, Химченко, 2014), который проявился не только в данных температуры и скорости звука, но также в резком вертикальном смещении звукорассеивающих слоев.

Во время наблюдений на абхазском шельфе у эстакады был зарегистрирован цуг короткопериодных внутренних волн, который относится к внутренним борам, но не совсем обычным (рис. 9). До подхода этого цуга термоклин был приповерхностным в прибрежной акватории. Он находился на глубинах 6–8 м при общей глубине места 13 м. Движущиеся внутренние волны с глубоких районов моря распространялись по приповерхностному термоклину и имели вид волн-углублений.

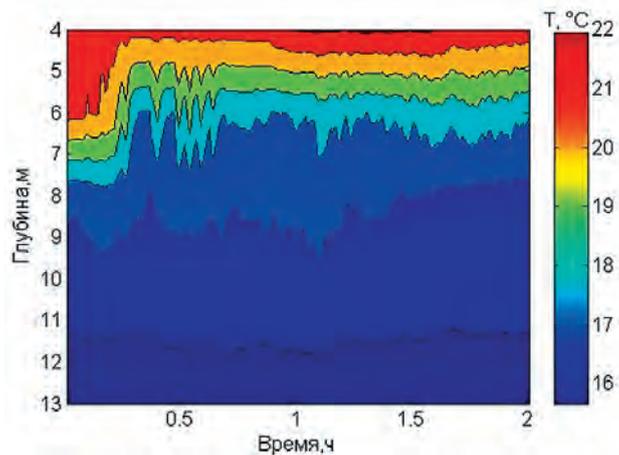


Рис. 9. Изменение температурной структуры моря во время подхода внутреннего бора по данным цепочки термисторов, Сухум 28 мая 2014 г.

При подходе цуга волн к берегу термоклин еще больше поднялся к поверхности моря из-за выхода придонных холодных вод, что вызвало необычную картину появления ступени холодной воды и волн-возвышений на приповерхностном термоклине. Высота наблюдаемого бора составила 2.5 м. Прохождение бора сопровождалось цугом из пяти короткопериодных внутренних волн с высотами 1,5–0,5 м и периодами 5–3 мин, происхождение которых связано с нелинейной трансформацией изначального волнового возмущения.

### Заключение

Внутренние волны являются важным компонентом динамики вод в бесприливном Черном море. В работе сравнивались внутренние волны, наблюдаемые на пологом шельфе у побережья Геленджика, приглубом шельфе у ЮБК, а также на узком и крутом шельфе Абхазии. В каждом районе зарегистрированы внутренние волны инерционного и короткопериодного диапазона. На основании анализа данных для каждого района исследований выявлены свои особенности. Так на узком и крутом шельфе Абхазии встречаются инерционные внутренние волны с максимальными высотами (более 20 м), в то время как на пологом геленджикском шельфе высота инерционных внутренних волн редко достигает 10 м. В наблюдениях на крымском шельфе были выявлены внутренние волны 2-ой моды, как инерционного, так и короткопериодного диапазона. На абхазском и геленджикском шельфе внутренние волны 2-ой моды отмечаются только для короткопериодного диапазона. Встречаемость инерционных внутренних волн 2-ой моды составила не более 30%, а короткопериодных волн еще меньше.

Авторы выражают благодарность сотрудникам МГИ РАН академику РАН В.А. Иванову и к.т.н. А.С. Кузнецову за предоставленную возможность проведения исследований с платформы МГИ, а также сотрудникам Института экологии АН Абхазии Г.В. Кенигсбергеру и В.П. Елистратову за помощь в проведении работ и сборе экспериментальных данных с эстакады ГИАНА. Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010) и при частичной поддержке РФФИ (проекты № 16-35-00454 мол\_а и № 17-52-40016 Абх\_а).

### Литература

- Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
- Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В. Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских вод на Гавайском шельфе // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104.
- Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В. Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на Российском шельфе Черного моря // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 135–142.
- Гончаров В.П., Непрочнов Ю.П., Непрочнова А.Ф. Рельеф дна и глубинное строение черноморской впадины. М.: Наука, 1972. 160 с.
- Иванов В.А., Коняев К.В. Бор на термоклине // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1976. Т. 12. № 12. С. 416–423.
- Иванов В.А., Коняев К.В., Серебряный А.Н. Группы интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17. № 12. С. 1302–1309.
- Иванов В.А., Серебряный А.Н. Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 6. С. 683–685.
- Иванов В.А., Серебряный А.Н. Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливно-

- моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 6. С. 661–665.
- Иванов В.А., Серебряный А.Н.* Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 6. С. 648–656.
- Иванов В.А., Лисиченок А.Д., Серебряный А.Н., Тарасов Л.Л.* Внутренние боры в прибрежной зоне Черного моря // Акустика океана. Докл. 11-ой школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2006. С. 330–335.
- Иванов Ю.А., Мельников В.А., Новицкий А.Г.* Обтекание неровностей дна стратифицированным потоком // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13. № 12. С. 1278–1286.
- Иванов Ю.А., Смирнов Б.А., Тареев Б.А., Филлюшкин Б.Н.* Экспериментальные исследования колебаний температуры в море в диапазоне частот внутренних гравитационных волн // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 3. С. 416–425.
- Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // Докл. АН СССР. 1973. Т. 209. № 1. С. 86–89.
- Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Волны внутри океана. С.-П.: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
- Кортаев Г.К., Сабинин К.Д.* Инерционные колебания на течении со сдвигом скорости произвольного профиля // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 2. С. 215–216.
- Кортаев Г.К.* Инерционные колебания и преобразование Галилея // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 227–231.
- Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю.* Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.
- Медведев И.П., Архипкин В.С.* Колебания уровня моря в Голубой бухте (Геленджик) // Вестник Московского университета. 2016. Серия 5. № 3. С. 70–78.
- Мельников В.А.* Влияние рельефа дна на внутренние волны // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 7. С. 775–778.
- Морозов Е.Г.* Океанские внутренние волны. Наука, 1985. 151 с.
- Сабинин К.Д., Кортаев Г.К.* Инерционные колебания в присутствии сдвигового течения в океане // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 399–405.
- Серебряный А.Н.* Внутренние волны в прибрежной зоне приливного моря // Океанология. 1985. Т. 25. № 5. С. 744–751.
- Серебряный А.Н.* Эффекты нелинейности во внутренних волнах на шельфе // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 3. С. 285–293.
- Серебряный А.Н.* Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 2. С. 244–252.
- Серебряный А.Н., Иванов В.А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. № 3. С. 34–45.
- Серебряный А.Н., Химченко Е.Е.* Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 88–104.
- Ямпольский А.Д.* О внутренних волнах в Черном море по наблюдениям на многосуточной якорной станции // Труды ИОАН СССР. 1960. Т. 39. С. 111–126.
- Vaines P.G.* On internal tide generation models // Deep-Sea Res. 1982. Vol. 29. No. 3. P. 307–338.

- Carr M., Davies P.A., Hoebbers R.P.* Experiments on the structure and stability of mode-2 internal solitary-like waves propagating on an offset pycnocline // *Phys. Fluids*. 2015. Vol. 27, No. 4. P. 046602.
- Deepwell D., Stastna M., Carr M., Davies P.A.* Interaction of a mode-2 internal solitary wave with narrow isolated topography // *Physics of Fluids*. 2017. Vol. 29. No. 7. P. 076601.
- Holloway P.* Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West shelf // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. No. C5. P. 5405–5416.
- Konyaev K.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Large-amplitude internal waves at the Mascarene Ridge in the Indian Ocean // *Deep-Sea Research*. 1995. Vol. 42. No. 11/12. P. 2075-2091. DOI: 10.1016/0967-0637(95)00067-4.
- Mayer D.A., Moffeld H.O., Leaman K.D.* Near-inertial internal waves observed on the outer shelf in the Middle Atlantic Bight in the wake of hurricane Belle // *J. Phys. Oceanog.* 1981. No. 11. P. 87–106.
- Morozov E.G.* *Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling: A Global View* // Springer, 2018. 304 p.
- Noble M., Jones B., Hamilton P., Xu J., Robertson G., Rosenfeld L., Largier J.* Cross-shelf transport into nearshore waters due to shoaling internal tides in San Pedro Bay, CA // *Continental Shelf Research*. P. 1768–1785.
- Serebryany A.N.* *Mode 2 Internal Waves in the Ocean: Evidences from Observations* // *The Ocean in Motion*. Springer, Cham, 2018. P. 211–219.
- Shroyer E.L., Moum J.N., Nash J.D.* Energy transformations and dissipation of nonlinear internal waves over New Jersey's continental shelf // *Nonlinear processes in Geophysics*. 2010. Vol. 17. No. 4. P. 345–360. <https://doi.org/10.5194/npg-17-345-2010>.
- Walter R.K., Phelan P.J.* Internal bore seasonality and tidal pumping of subthermocline waters at the head of the Monterey submarine canyon // *Continental Shelf Research*. 2016. Vol. 116. P. 42–53.
- Yang Y.J., Fang Y.C., Chang M.-H., Ramp S.R., Kao C.-C., Tang T.Y.* Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea // *J. Geophys. Res.* 2009. 114. C10003.
- Yang Y.J., Fang Y.C., Tang T.Y., Ramp S.R.* Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2010. Vol. 17. No. 6. P. 605–614.
- Yuan C., Grimshaw R., Johnson E.* The evolution of second mode internal solitary waves over variable topography // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 836. P. 238–259.

**INTERNAL WAVES ON THE CAUCASIAN AND CRIMEAN SHELVES  
OF THE BLACK SEA (ACCORDING TO SUMMER-AUTUMN  
OBSERVATIONS 2011-2016)**

**E.E. Khimchenko<sup>1</sup>, A.N. Serebryany<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia*  
*e-mail: ekhym@ocean.ru*

<sup>2</sup> *Andreyev Acoustics Institute JSC, Moscow, 117036, Russia*  
*e-mail: serebryany@hotmail.com*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

The results of observations of internal waves on the Crimean and Caucasian shelves of the Black Sea conducted between 2011 and 2016 are analyzed and generalized. The measurements were carried out on moored stations equipped with chains of autonomous temperature sensors, as well as by vertical profiling of the water column with the miniSVP probe and the acoustic Doppler current profiler (ADCP). The observed internal waves are compared for three types of shelf: the shallow (Gelendzhik shelf), the shallow (offshore South Coast) and the sharp descent of depths (the Abkhazian shelf). Long-term observations of the field of internal waves on the Black Sea shelf confirm the almost constant presence of internal quasi-inertial oscillations of the thermocline, short-period internal waves with periods from one to tens of minutes are often recorded. On the Black Sea shelf, internal waves of the lower mode predominate, but waves of the second mode also occur. On the shelf with a sharp descent of depths, there are internal waves of maximum heights. Examples of recorded inertial and short-period internal waves are presented. The frequency spectra of internal waves are presented, as well as the statistics of occurrence and the estimation of the intermittency of inertial and short-period internal waves for the three shelf regions.

**Keywords:** inertial internal waves, short-period internal waves, second-mode internal waves, the Black Sea, the shelf of the Crimea and the Caucasus

### References

- Baines P.G.* On internal tide generation models, *Deep-Sea Res.*, 1982, Vol. 29, No. 3, pp. 307–338.
- Blatov A.S., Bulgakov N.P., Ivanov V.A., Kosarev A.N., and Tuzhilkin V.S.* *Izmenchivost' gidrofizicheskikh polei Chernogo morya* (Variability of the hydrophysical fields of the Black Sea), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 240 p.
- Bondur V.G., Sabinin K.D., and Grebenyuk Yu.V.* Anomal'naya izmenchivost' inertsionnykh kolebaniy okeanskikh vod na Gavaiskom shel'fe (Abnormal variability of inertial oscillations of ocean waters on the Hawaiian shelf), *Doklady Akademii nauk*, 2013, Vol. 450, No. 1, pp. 100–104.
- Bondur V.G., Sabinin K.D., and Grebenyuk Yu.V.* Kharakteristiki inertsionnykh kolebaniy po dannym eksperimental'nykh izmereniy techeniy na Rossiiskom shel'fe Chernogo morya (Characteristics of inertial oscillations according to experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 1, pp. 135–142.
- Carr M., Davies P.A., and Hoebers R.P.* Experiments on the structure and stability of mode-2 internal solitary-like waves propagating on an offset pycnocline, *Phys. Fluids*, 2015, Vol. 27, No. 4, pp. 046602.
- Deepwell D., Stastna M., Carr M., and Davies P. A.* Interaction of a mode-2 internal solitary wave with narrow isolated topography, *Physics of Fluids*, 2017, Vol. 29, No. 7, pp. 076601.
- Goncharov V.P., Neprochnov Yu.P., and Neprochnova A.F.* Rel'ef dna i glubinnoe stroenie chernomorskoj vpadiny (Bottom relief and deep structure of the Black Sea trough), Moscow: Nauka, 1972, 160 p.
- Holloway P.* Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West shelf, *J. Geophys. Res.*, 1987. Vol. 92. No. C5, pp. 5405–5416.
- Ivanov V.A. and Konyaev K.V.* Bor na termokline (Bore on thermocline), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1976, Vol. 12, No. 12, pp. 416–423.
- Ivanov V.A. and Serebryanyi A.N.* Chastotnye spektry korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v besprilivnom more (Frequency spectra of short-period internal waves in the nontidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1982, Vol. 18, No. 6, pp. 683–685.
- Ivanov V.A. and Serebryanyi A.N.* Vnutrennie volny na melkovodnom shel'fe besprilivnogo morya

- (Internal waves on the shallow shelf of the nontidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1983, Vol. 19, No. 6, pp. 661–665.
- Ivanov V.A. and Serebryanyi A.N. Korotkoperiodnye vnutrennie volny v pribrezhnoi zone besprilivnogo morya (Short-period internal waves in the coastal zone of nontidal sea), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1985, Vol. 21, No. 6, pp. 648–656.
- Ivanov V.A., Konyaev K.V., and Serebryanyi A.N. Gruppy intensivnykh vnutrennikh voln v shel'fovoi zone morya (Groups of intense internal waves in the shelf zone of the sea), *Izv. AN SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 1981, Vol. 17, No. 12, pp. 1302–1309.
- Ivanov V.A., Lisichenok A.D., Serebryanyi A.N., and Tarasov L.L. Vnutrennie bory v pribrezhnoi zone Chernogo morya (Internal bores in the coastal zone of the Black Sea), *Akustika okeana. Dokl. 11-oi shkoly-seminara akad. L.M. Brekhovskikh, M.: GEOS*, 2006, pp. 330–335.
- Ivanov Yu.A., Mel'nikov V.A., and Novitskii A.G. Obtekanie nerovnosti dna stratifitsirovannym potokom (Circumvention over the unevenness of the bottom by a stratified flow), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1977, Vol. 13, No. 12, pp. 1278–1286.
- Ivanov Yu.A., Smirnov B.A., Tareev B.A., and Filyushkin B.N. Eksperimental'nye issledovaniya kolebaniy temperatury v more v diapazone chastot vnutrennikh gravitatsionnykh voln (Experimental studies of temperature variations in the sea in the frequency range of internal gravity waves), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1969, Vol. 5, No. 3, pp. 416–425.
- Konyaev K.V. and Sabinin K.D. Novye dannye o vnutrennikh volnakh v more, poluchennye s pomoshch'yu raspredelennykh datchikov temperatury (New data of internal waves in the sea, obtained with the help of distributed temperature sensors), *Dokl. AN SSSR*, 1973, Vol. 209, No. 1. pp. 86–89.
- Konyaev K.V. and Sabinin K.D. Volny vnutri okeana (Waves inside the ocean), St.-Peterburg: Gidrometeoizdat, 1992, 272 p.
- Korotaev G.K. Inertsionnye kolebaniya i preobrazovanie Galileya. (Inertial oscillations and Galilean transformation), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2018, Vol. 54, No. 2, pp. 227–231.
- Konyaev K.V., Sabinin K.D., and Serebryanyi A.N. Large-amplitude internal waves at the Mascarene Ridge in the Indian Ocean, *Deep Sea Res.*, 1995, Vol. I 42, pp. 20–75.
- Korotaev G.K., Sabinin K.D. Inertsionnye kolebaniya na techenii so sdvigom skorosti proizvol'nogo profilya (Inertial oscillations on the flow with speed shift of an arbitrary profile), *Doklady Akademii nauk*, 2017, Vol. 475, No. 2, pp. 215–216.
- Lavrova O.Yu., Serebryanyi A.N., Mityagina M.I., and Bocharova T.Yu. Podsputnikovye nablyudeniya melkomasshtabnykh gidrodinamicheskikh protsessov v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya (Sub-satellite observations of small-scale hydrodynamic processes in the northeastern part of the Black Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 308–322.
- Mayer D.A., Moffeld H.O., and Leaman K.D. Near-inertial internal waves observed on the outer shelf in the Middle Atlantic Bight in the wake of hurricane Belle, *J. Phys. Oceanog*, 1981, No. 11, pp. 87–106.
- Medvedev I.P. and Arkhipkin V.S. Kolebaniya urovnya morya v Goluboi bukhte (Gelendzhik) (Sea-level fluctuations in the Blue Bay (Gelendzhik)), *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 2016, Seriya 5, No. 3, pp. 70–78.
- Mel'nikov V.A. Vliyanie rel'efa dna na vnutrennie volny (Influence of the bottom relief on internal waves), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1982, Vol. 18, No. 7, pp. 775–778.
- Morozov E.G. Oceanic Internal Tides: Observations, Analysis and Modeling: A Global View, Springer, 2018, 304 p.

- Morozov E.G. Okeanskie vnutrennie volny. Moskva: Nauka, 1985, 151 p.
- Noble M., Jones B., Hamilton P., Xu J., Robertson G., Rosenfeld L., and Largier J. Cross-shelf transport into nearshore waters due to shoaling internal tides in San Pedro Bay, CA, *Continental Shelf Research*, 2009, Vol. 29, No. 15, pp. 1768-1785, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.04.008>.
- Sabinin K. D. and Korotaev G. K. Inertsionnye kolebaniya v prisutstvii sdvigovogo techeniya v okeane (Inertial oscillations in the presence of a shear flow in the ocean), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 53, No. 3, pp. 399–405.
- Serebryanyi A.N. and Ivanov V.A. Issledovaniya vnutrennikh voln v Chernom more s okeanograficheskoi platformy MGI (Internal waves observations in the Black Sea from the stationary platform of MHI), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2013, No. 3, pp. 34–45.
- Serebryanyi A.N. and Khimchenko E.E., Issledovaniya vnutrennikh voln na kavkazskom i krymskom shel'fakh letom 2013 g (Observations of internal waves at Caucasian and Crimean shelves of the Black Sea in summer 2013), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 88–104.
- Serebryanyi A.N. Effekty nelineinosti vo vnutrennikh volnakh na shel'fe (Nonlinear effects in the internal waves at the shelf), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1990, Vol. 26, No. 3, pp. 285–293.
- Serebryanyi A.N. Mode 2 Internal Waves in the Ocean: Evidences from Observations, *The Ocean in Motion*, Springer, Cham, 2018, pp. 211–219.
- Serebryanyi A.N. Proyavlenie svoistv solitonov vo vnutrennikh volnakh na shel'fe (Manifestation of soliton properties on internal waves on a shelf), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 1993, Vol. 29, No. 2, pp. 244–252.
- Serebryanyi A.N. Vnutrennie volny v pribrezhnoi zone prilivnogo morya (Internal waves in the coastal zone of the tidal sea), *Okeanologiya*, 1985, Vol. 25, No. 5, pp. 744–751.
- Shroyer E.L., Moum J.N., and Nash J.D. Energy transformations and dissipation of nonlinear internal waves over New Jersey's continental shelf, *Nonlinear processes in Geophysics*, 2010, Vol. 17, No. 4, pp. 345.
- Walter R.K. and Phelan P.J. Internal bore seasonality and tidal pumping of subthermocline waters at the head of the Monterey submarine canyon, *Continental Shelf Research*, 2016, Vol. 116, pp. 42–53.
- Yampol'skii A.D. O vnutrennikh volnakh v Chernom more po nablyudeniya na mnogosutochnoi yakornoi stantsii (On internal waves in the Black Sea from observations at a long-term anchor station), *Trudy IOAN SSSR*, 1960, Vol. 39, pp. 111–126.
- Yang Y.J., Fang Y.C., Chang M.-H., Ramp S.R., Kao C.-C., and Tang T.Y. Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, C10003.
- Yang Y. J., Fang Y.C., Tang T.Y., and Ramp S.R. Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010, Vol. 17, No. 6, pp. 605.
- Yuan C., Grimshaw R., and Johnson E. The evolution of second mode internal solitary waves over variable topography, *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, Vol. 836, pp. 238–259.

## ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРО- И СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ДНА НА ШЕЛЬФЕ

**Ю.М. Заславский, В.Ю. Заславский**

*Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)  
603950, Нижний Новгород, Ульянова ул., 46  
Тел.: (831) 436-4764; Факс: (831)436-5745 e-mail: [zaslav@appl.sci-nnov.ru](mailto:zaslav@appl.sci-nnov.ru)*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.09.2018

Представлены результаты трехмерного численного моделирования гидроакустического и донного сейсмического поля монополя, погруженного в воду на мелководье с целью зондирования донной среды. Для нескольких опорных частот в полосе 100–200 Гц демонстрируются особенности структуры гидроакустических волн в жидкости, сейсмических волн в твердом дне и на границе раздела жидкость–дно. Показана возможность получения признаков, важных для дистанционной диагностики параметров придонных слоев на основе особенностей пространственного амплитудного рельефа, образуемого поверхностной волной на границе с водой.

**Ключевые слова:** донные, поверхностные, каналовые, волны, акустический, монополь, морская сейсморазведка

### Введение

Исследование возможности зондирования придонных пластов с пониженной плотностью и жесткостью, залегающих непосредственно под дном водного бассейна на шельфе, представляет собой актуальную задачу, вследствие сложностей, возникающих при обнаружении слабо разрешаемых слоев стандартными средствами морской сейсморазведки [1]. Численное моделирование в этом направлении с применением разных подходов [2] проводится многими авторами, при этом настоящее исследование выполняется с использованием конечно-элементного метода, реализуемого современными вычислительными средствами. В этой связи обратимся к результатам 3D-моделирования гидроакустической и донной сейсмической волн, генерируемых гидроакустическим источником и создающим квази-гармонический сигнал, перестраиваемый в полосе частот 100–200 Гц. В качестве основных рассматриваются особенности поверхностной волны на границе раздела жидкость–дно и донной каналовой волны, сосредоточенной в области инородного донного слоя.

Представляет интерес путем моделирования проанализировать амплитудное волновое распределение сейсмосигнала на донной границе непосредственно под источником возмущения как в горизонтальной плоскости на границе раздела вода–дно, так и в вертикальном сечении интерфейса. 3D-моделирование применяется

как удобное средство демонстрации принципиальной возможности диагностики подповерхностной донной структуры – установления признаков наличия слоя с инородными (относительно окружающей донной толщи) характеристиками и получения оценочных данных о его параметрах (толщина, глубина залегания, плотность, скорость волн сжатия и сдвига) на основе регистрации указанных волн. При этом с использованием простейших моделей слоистой структуры (в приграничной области вода–дно) предполагается рассмотреть особенности рельефа, образуемого на границе амплитудным распределением поперечной донной волны при перестройке частоты в некоторой «информативной» частотной полосе, для чего выбран незначительный по масштабам участок  $100 \times 100 \text{ м}^2$  указанной границы. Необходимо убедиться, что конфигурация волнового рельефа (или их стандартный набор для нескольких характерных – опорных частот) несет информацию об особенностях вертикального разреза (скоростной, плотностной и т.д.), что может подтвердить только принципиальную целесообразность развиваемого подхода.

Поскольку для выполнения надежного прогноза при разведке «на нефть» требуются площади и глубины километровых масштабов, участок указанных размеров будет недостаточным, поэтому здесь не обсуждаются вопросы устройства и размещения планарной антенны гидрофонов или набор параллельных кос донных сейсмоприемников (вероятно, волоконно-оптико-акустических). Тем не менее, масштабы, выбранные в рассматриваемом случае для моделирования, вполне пригодны для решения задач поиска железо-марганцевых конкреций, «погребенных» в донных илистых отложениях. Безусловно, в применении к условиям реальных сейсмопоисковых разведочных работ на «углеводородную залежь» необходим охват обозреваемых площадей с километровыми масштабами по латерали. Можно предположить, что в этом случае при моделировании амплитудного волнового распределения сейсмосигнала на донной границе, следует перейти к более низкочастотному диапазону, сохраняя «принцип подобия», т.е. выбирая ту же величину отношения пространственного шага в расчетной области к длине волны. Не исключается использование средств, обладающих более высоким уровнем быстродействия и расширенной оперативной памятью. Не касаясь вопросов, связанных с указанной перспективой, далее обратимся к рассмотрению волновых рельефов, создаваемых одиночным монополюсным акустическим источником, демонстрируемых в качестве примера, где 3D-моделирование успешно выполняется и адекватно задачам морской сейморазведки, решаемым на масштабе малой площади.

### Условия моделирования

Акустический монополь пульсирует в 10 м от границы жидкость-дно в бассейне глубиной 50 м, дно которого – скальный грунт ( $\rho = 2,73 \text{ г/см}^3$ ,  $c_1 = 6,12 \text{ км/с}$ ,  $c_t = 3,08 \text{ км/с}$ ). На глубине 6 м под дном залегает инородный пласт толщиной 1.5 м (другой вариант 4 м), сложенный из рыхлого пористого материала ( $\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$ ,  $c_1 = 1,93 \text{ км/с}$ ,  $c_t = 0,77 \text{ км/с}$ ).

### Результаты моделирования

Так, применительно к случаю частоты пульсаций источника равной 100 Гц, рыхлого пласта толщиной 1.5 м на рис. 1а в изометрии представлено амплитудное распределение акустического давления в воде (верхняя часть), в нижней части – распределение по амплитуде колебательных смещений на границе жидкость–дно, а также в объемном сейсмоакустическом поле в донной среде на глубинах до 50 м. На рис. 1б на вертикальном разрезе (сечение  $r, z$ -плоскостью) также представлено амплитудное распределение в сейсмоакустическом поле вглубь донной толщи и вблизи границы.

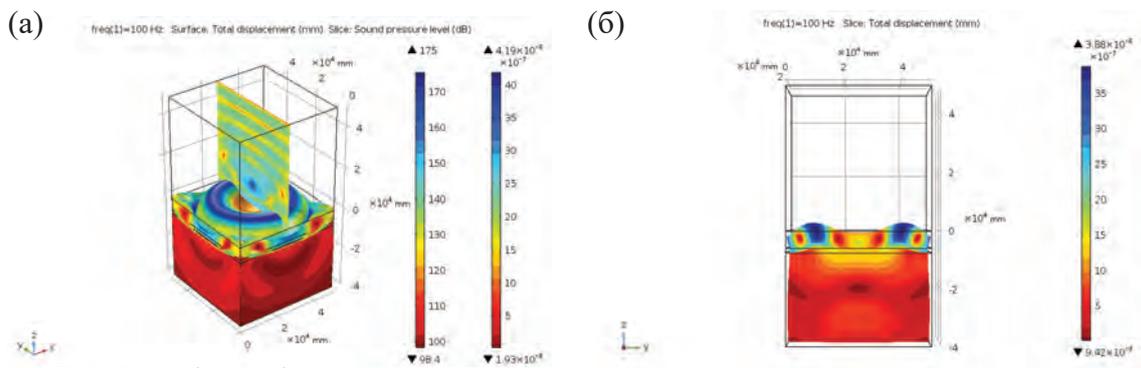


Рис. 1. а – (вверху) – пространственное амплитудное распределение акустического давления в воде, (внизу) – амплитудное распределение колебательных смещений сейсмоакустического поля в донном пространстве и на границе жидкость–дно, б – (вертикальный разрез) – амплитудное распределение колебательных смещений сейсмоакустического поля в донном пространстве и на границе.

Пласт 1.5 м, частота 100 Гц.

При повышении частоты излучения меняется характер пространственного распределения амплитуды в обоих сечениях (горизонтальном и вертикальном), что проявляется в уменьшении пространственного периода в последовательности концентрических колец, образуемых пучностями в волновом рельефе на границе. Максимум амплитуды в пучностях приходится на кольца с несколько большим диаметром.

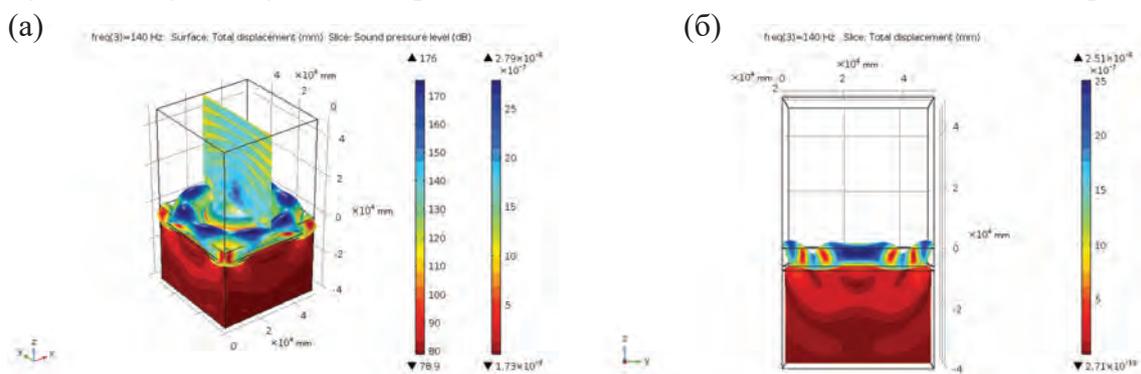


Рис. 2. а – (вверху) – пространственное амплитудное распределение давления в гидроакустическом поле, (внизу) – амплитудное распределение колебательных смещений сейсмоакустического поля в донном пространстве и на границе жидкость–дно, б – (вертикальный разрез) – амплитудное распределение колебательных смещений сейсмоакустического поля в донном пространстве и на границе.

Пласт 1.5 м, частота 140 Гц.

Перестройка вверх по частоте также приводит к амплитудным вариациям вдоль азимутальной координаты. Сказанное подтверждается иллюстрациями на рис. 2а, б, на которых представлено пространственное амплитудное распределение в тех же сечениях, соответствующих частоте пульсаций 140 Гц, а на рис. 3а, б для частоты 200 Гц.

На основе сравнения амплитудных распределений можно предположить, что особенности волнового рельефа на границе (с учетом их совокупности в широкой полосе частот) следует рассматривать как важные признаки для дистанционной диагностики донной среды.

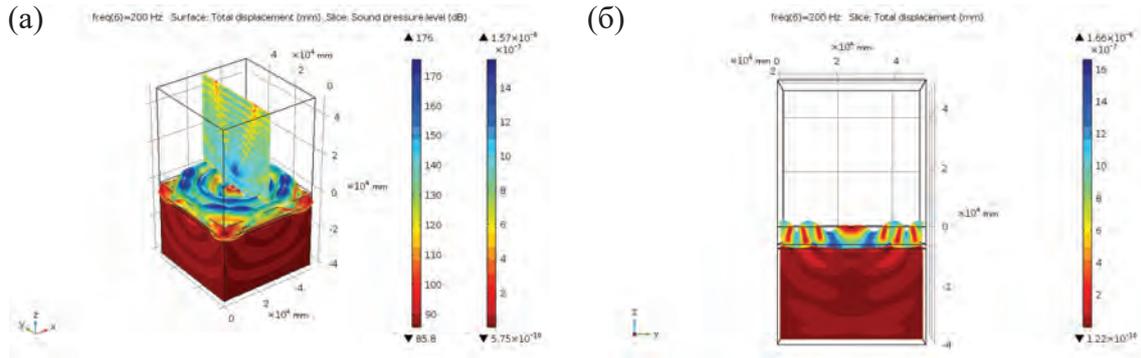


Рис. 3. То же, что на рис. 1 и на рис. 2. Пласт толщиной 1.5 м, частота 200 Гц.

Аналогично изложенному выше, на рис. 4а представлено амплитудное распределение акустического давления в воде (верхняя часть) применительно к случаю зондирования пласта толщиной 4 м, а в нижней части – распределение по амплитуде колебательных смещений на границе жидкость–дно и в сейсмоакустическом поле в донной среде. В этом случае уже на самой низкой частоте излучения – 100 Гц – в исследуемой полосе в волновом поверхностном рельефе (расчетная область по горизонтали охватывает те же пределы 100 x 100 м<sup>2</sup>) возникает кольцевая структура с большим числом колец с более мелким периодом, кроме того, присутствуют амплитудные вариации по углу азимута. На рис. 4б на вертикальном разрезе (сечение *r*, *z*-плоскостью) представлено амплитудное распределение в сейсмоакустическом поле вглубь донной толщи и вблизи границы. На границе с водой кольцевая структура уверенно прослеживается, несмотря на то, что максимальные амплитудные значения достигаются внутри заглубленного под границу слоя с пониженными плотностью и жесткостью. Данные моделирования свидетельствуют о возбуждении высших мод поверхностной и каналовой волн.

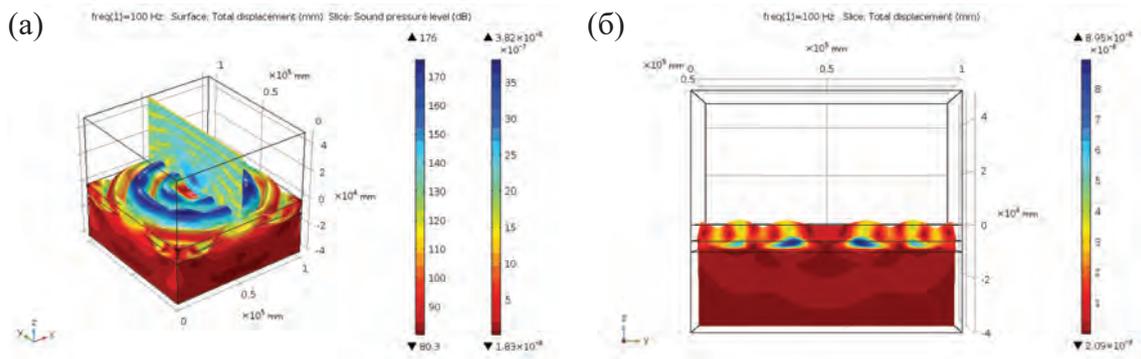


Рис. 4. То же, что на предыдущих рисунках. Пласт толщиной 4 м, частота 100 Гц.

Результаты моделирования волновой структуры при зондировании более мощного пласта – толщиной 4 м – для излучения на более высоких частотах даны на следующих иллюстрациях, представленных на рис. 5а, б для частоты 160 Гц и аналогично – на рис. 6а, б для частоты 200 Гц.

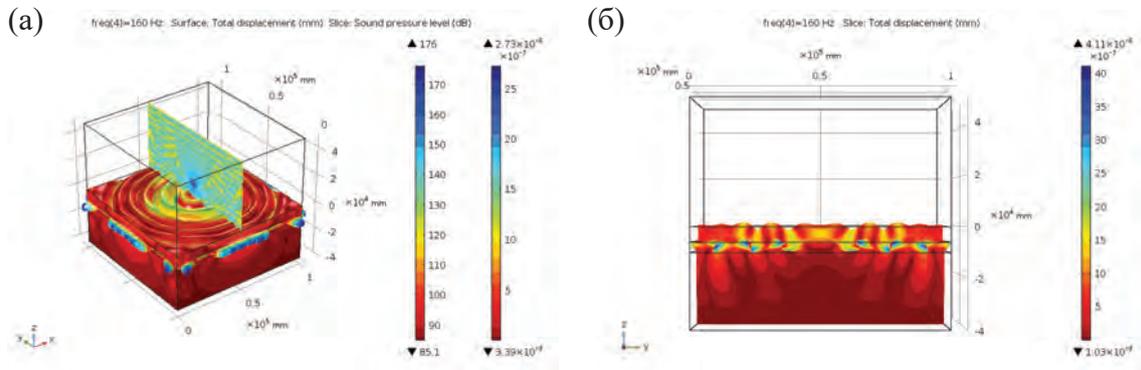


Рис. 5. То же, что на предыдущих рисунках. Пласт толщиной 4 м, частота 160 Гц.

Здесь, как и в предыдущем случае, видно измельчение периода кольцевой структуры рельефа на границе с жидкостью, а также возникновение, либо, наоборот, выглаживание периодических азимутальных вариаций по амплитуде, которые при перестройке вверх по частоте могут сменять друг друга. Эта особенность, как ранее уже указывалось, связана с возбуждением мод поверхностной и каналовой волн высших номеров. Сравнивая данные визуализации амплитудного распределения применительно к случаям зондирования придонного пространства с заглубленным рыхлым пластом разной толщины – 1.5 м и 4 м, можно видеть неодинаковую изменчивость волнового рельефа, возникающую при частотной перестройке при различии в мощности придонного слоя.

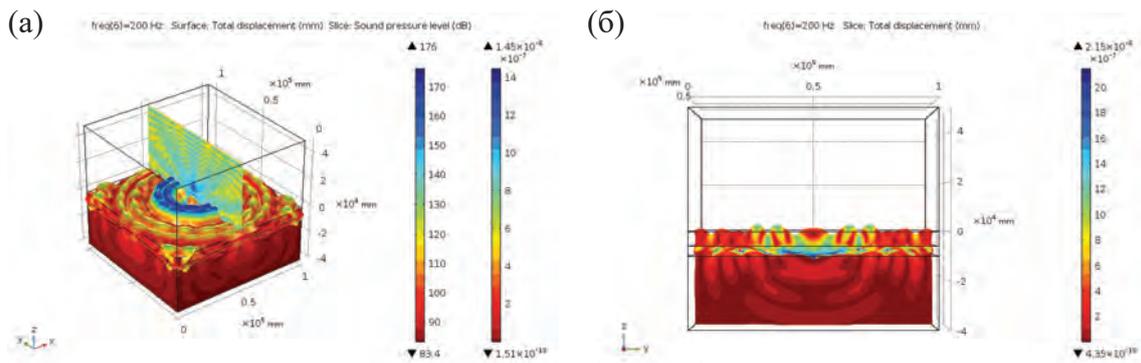


Рис. 6. То же, что на предыдущих рисунках. Пласт толщиной 4 м, частота 200 Гц.

Так, в рамках грубой оценки, характерным масштабом периодичности концентрических колец рельефа в случае тонкого прослоя являются линейные размеры порядка 10 м и более, а для более мощного – менее 8–10 м, причем как по радиальной, так и по азимутальной координате.

Следовательно, анализ амплитудного распределения на границе вода–дно, обусловленного поверхностной волной, возбуждаемой гидроакустическим источником, установленным на расстоянии в десятках метров от границы, излучение

которого перестраивается в полосе частот 100–200 Гц, позволяет рассматривать особенности волнового рельефа на поверхности в качестве признака присутствия инородного слоя, сложенного из рыхлого пористого материала, в непосредственной близости от границы. Ввиду изложенного выше, возможна ориентировочная оценка толщины пласта и глубины его залегания.

В дополнение к изложенному, численное моделирование, выполненное при частотной перестройке гидроакустического излучения, показало, что изменение амплитудного уровня поверхностной волны с частотой также может рассматриваться в качестве признака при оценке толщины и глубины залегания такого пласта под донной границей.

На рис. 7 представлена зависимость максимального амплитудного отклика в возбуждаемой поверхностной волне от перестраиваемой частоты (в полосе 100–200 Гц) в случаях слоя малой мощности (1.5 м – кривая 1) и для более мощного слоя (4 м – кривая 2). В полосе перестройки для слабо разрешаемого слоя (1) имеется единственный максимум вблизи частоты  $\sim 90$  Гц, в то время как для более мощного (2) – таких максимумов два, которые соответствуют двум резонансам вблизи частот  $\sim 90$  Гц и  $\sim 150$  Гц.

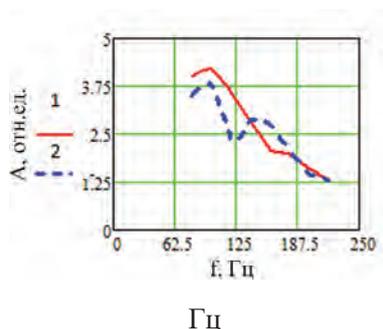


Рис. 7. Частотная зависимость максимального амплитудного отклика поверхностной волны. Амплитуда в относительных единицах.

### Заключение

Амплитудное распределение поля акустического давления в воде и волновых смещений на границе вода–дно и в твердой донной среде, порождаемые гидроакустическим источником, получены при трехмерном численном моделировании (конечно-элементный метод) и демонстрируются на ограниченном масштабе – в пределах  $100 \times 100 \text{ м}^2$ . Простейшая мелкослоистая модель скоростного разреза донной среды и незначительный по масштабам участок указанной границы используется исключительно в методических целях демонстрации возможности выявления признаков, полезных для диагностирования прослоев с пониженной скоростью, присутствующих в придонной области.

В дальнейшем в развитие излагаемого подхода представляет интерес обсуждение особенностей, привносимых за счет применения группирования гидроакустических источников с различной их взаимной фазировкой.

Особенности амплитудного распределения на границе вода–дно, соответствующие нескольким «опорным» частотам в полосе 100–200 Гц, и характер зависимости уровня волнового отклика при плавной перестройке частоты, рассматриваются как предпосылки или признаки при диагностике присутствия маломощного слоя в придонной области, а также подтверждают возможность оценки его толщины. Существуют определенные перспективы, позволяющие считать возможной практическую реализацию результатов проведенного моделирования, что связано со все более широким внедрением в морскую сейсморазведку оптоволоконных планарных донных сейсмических антенных решеток. Вместе с тем реальные масштабы, используемые в морской донной сейсморазведке, превышают моделируемые в настоящей работе на порядки. Поэтому необходимо дальнейшее развитие изложенных результатов, предполагается оптимизация способа регистрации сейсмических и гидроакустических сигналов и дальнейшее обсуждение условий их применения.

### Литература

- Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И.* Когерентное сейсмоакустическое профилирование морского дна широкополосными сигналами // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 6. С. 843–850.
- Jensen Finn B., Kuperman William A., Porter Michael B. Schmidt Henrik* *Computation Ocean Acoustics*. Springer. 2011.

## THREE DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATION OF HYDRO AND SEISMIC-ACOUSTIC WAVES BY SHELF BOTTOM PROFILING

**Yu.M. Zaslavsky, V.Yu. Zaslavsky**

*Institute of applied physics Russian academy of science (IAP)  
46, Ul'janov Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia  
Tel.: (831) 436–4764; Fax: (831) 436-5745 e-mail: [zaslav@appl.sci-nnov.ru](mailto:zaslav@appl.sci-nnov.ru)*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.09.2018

3D numerical simulation of hydro and seismic waves generated by acoustic monopole submerged in shallow water for seismic profiling of bottom medium is demonstrated. Peculiarities of hydroacoustic waves in the water, seismic field configuration in the bottom interior and fluid-solid interface are presented at several frequencies of the bound 100–200Hz. Capability of remote diagnostics of the subsurface layers lying immediately under the bottom is analyzed. The diagnostic signs are found in the features of amplitude spatial relief formatting with surface wave on fluid-solid interface.

**Keywords:** bottom, surface, channel, waves, acoustic, monopole, sea, seismic, prospecting

### References

- Lazarev V.A., Malekhanov A.I., Merklin L.R., Romanova V.I., Talanov V.I., and Hil'ko A.I.* Kogerentnoe seismoakusticheskoe profilirovanie morskogo dna shirokopolosnymi signalami. *Okeanologiya*, 2013, Vol. 53, No. 6, pp. 843–850.
- Jensen Finn B., Kuperman William A., Porter Michael B., and Schmidt Henrik* Computation Ocean Acoustics, Springer. 2011.

## ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕСИ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ «МАРГИНАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР РЕКИ СЕВЕРНАЯ ДВИНА»

**А.И. Коченкова, А.Н. Новигатский, В.В. Гордеев,  
В.Б. Коробов, С.К. Белоруков, А.С. Лохов, А.Е. Яковлев**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: kochen.a@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.06.2018

В статье представлены результаты первых трех лет работы по проекту Обсерватории «Маргинальный фильтр реки Северная Двина», цель которого состоит в регулярных исследованиях седиментационных, геохимических и биологических процессов в нижнем течении Северной Двины. Пробы поверхностной воды отбирались пластиковым ведром каждый месяц в течение трех лет в двух точках в черте г. Архангельск (Яхт-клуб) и вблизи порта Экономии. На основании собранных авторами материалов определены концентрации взвешенного вещества, взвешенного органического углерода (ВОУ) и растворенного органического углерода (РОУ) в разные сезоны года. Показано, что максимальные концентрации взвеси приходятся на период паводка и достигают 46 мг/л, а минимальные характерны для периода зимней межени – до 1,5 мг/л, что соответствует максимальному и минимальному речному стоку. Средняя концентрация взвешенного вещества за трехлетний период составила 7,8 мг/л. Распределение концентрации ВОУ, выраженной в мг/л, в течение года повторяет распределение взвеси, и в среднем за три года составляет 0,82 мг/л. Содержание ВОУ, выраженное в % на сухую взвесь, в среднем за три года составило 8,5%. Сезонный максимум отмечен в весенне-летний период, когда он достигал 24,7%. Содержание РОУ варьирует в диапазоне 5,2 – 29,2 мг/л, составляя в среднем за три года 15,3 мг/л, что в 3 раза превышает среднее значение для рек Мира – 5,75 мг/л.

**Ключевые слова:** Северная Двина, взвешенное вещество, взвешенный и растворенный органический углерод, маргинальный фильтр

### Введение

Белое море исследуется со второй половины XIX столетия (Бергер, Наумов, 1995), оно изучено лучше других морей бассейна Северного Ледовитого океана. Новые подходы в изучении рассеянного осадочного вещества начались в XXI веке в рамках проекта «Система Белого моря» под руководством академика РАН А.П. Лисицына в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Система Белого моря, 2010, 2012, 2013, 2017), в том числе в 2015 г. открыта обсерватория «Маргинальный фильтр р. Северная Двина» в г. Архангельск.

Несмотря на многолетние исследования (Артемьев и др., 1984; Бреховских и др., 2003; Гордеев и др., 2012; Лещев и др., 2017; Федоров, Овсепян, Коробов, 2010; Федоров и др., 2011), проводимые в этом районе, остается много вопросов в изучении устьевой области реки Северная Двина, которая выносит более 50% растворенных и взвешенных веществ в Белое море. Северная Двина по водному стоку

занимает четвертое место в Европе. Ее протяженность составляет 744 км, водный сток 108 км<sup>3</sup>, сток взвешенных наносов 4,4 млн.т/год (Михайлов, 1997). Однако данные последних лет (за период 2000–2009 гг.) показали существенно более низкие объемы стока воды и взвеси – 95,4 км<sup>3</sup>/г и 0,811 млн.т/г (Гордеев и др., 2012). Площадь водосбора реки – 357000 км<sup>2</sup> составляет практически половину водосбора всех рек бассейна (рис. 1). В реку впадает около 62 тыс. постоянных притоков, общая длина которых около 200 тыс. км (Лисицын, 2010).

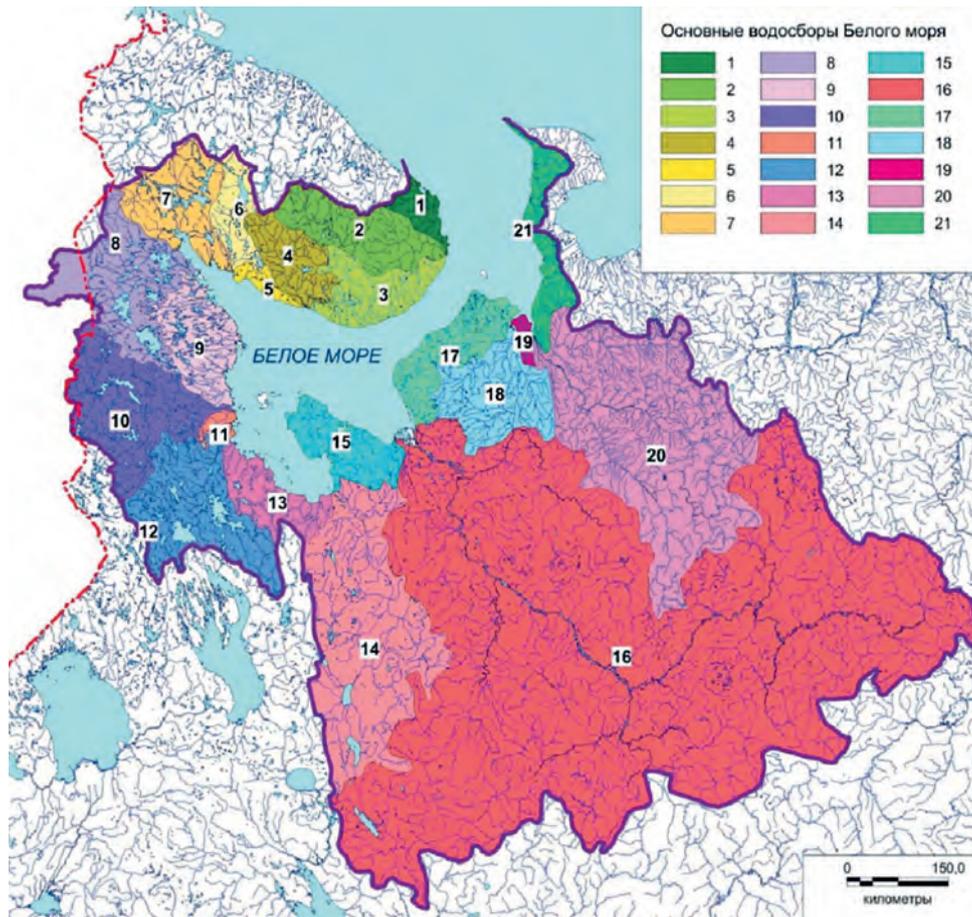


Рис. 1. Основные водосборы Белого моря: 1 – малые притоки от устья Поноя до мыса Святой Нос, 2 – Поной, 3 – малые притоки от Варзуги до Поноя, 4 – Варзуга, 5 – малые притоки от Умбы до Варзуги, 6 – Умба, 7 – Нива и малые притоки от устья Ковды до устья Умбы, 8 – Ковда, 9 – малые притоки от устья Ковды до устья Кеми, 10 – Кемь, 11 – малые притоки от устья Кеми до Беломорско-Балтийского канала, 12 – Беломорско-Балтийский канал (Выг), 13 – малые притоки от Беломорско-Балтийского канала до устья Онеги, 14 – Онега, 15 – малые притоки от устья Онеги до устья Северной Двины, 16 – Северная Двина, 17 – малые притоки от устья Северной Двины до устья Кулой, 18 – Кулой, 19 – малые притоки от устья Кулой до устья Мезени, 20 – Мезень, 21 – малые притоки от устья Мезени до мыса Канин Нос (Филатов и др., 2014)

Устьевой участок представлен многорукавной дельтой площадью 900 км<sup>2</sup>. Интерес представляют исследования в зоне смешения речных и морских вод – в маргинальном фильтре реки (МФ) (Лисицын, 1994), который является эффективными

барьером на пути растворенных и взвешенных веществ с континента в моря и океаны. Происходящая в устьевых областях рек трансформация материкового стока является одним из важнейших факторов, формирующих химический состав вод Мирового океана (Гордеев, 1983; 2009).

Маргинальные фильтры (Lisitzin, 1998; Лисицын, 2004) возникают в зонах смешения речных и морских вод в устьях рек. Эти фильтры являются современными частями областей лавинной седиментации. Система МФ включает в себя седиментосистему, сорбционные и биологические системы как ее составляющие. В гравитационной зоне, отличающейся высокой мутностью вод, активно осаждаются песчано-алевритовые фракции взвесей. В физико-химической зоне происходит захват растворенных соединений аморфными частицами, образующихся при флокуляции коллоидных фракций железа и органики. После массового осаждения взвешенных частиц создаются благоприятные условия для интенсивного развития фитопланктона (прозрачные воды, хорошая инсоляция, высокие концентрации биогенных веществ) – это третья, биологическая зона МФ. Было показано (Гордеев, 2012; Гордеев и др., 2012), что переходная между континентом и океаном зона река–море (МФ) является эффективной ловушкой и областью трансформации всех видов осадочного материала глобального масштаба. Маргинальные фильтры – это главная область накопления взвешенного и частично растворенного углерода.

Устьевые участки являются барьерами на пути выноса загрязняющих веществ в прибрежные зоны арктических морей (Лисицын, 1994). Наиболее загрязненным участком Северной Двины является ее нижнее течение близ устья, где расположены крупные населенные пункты с развитой промышленностью и энергетикой (Брызгалов, Иванов, Нечаева, 2002).

В мае 2015 г. на базе Северо-Западного отделения ИО РАН создана исследовательская станция «Обсерватория – Маргинальный фильтр реки Северная Двина». Цель проекта – изучение концентраций растворенных и взвешенных веществ (биогенные элементы, органический углерод, макро- и микроэлементный состав, углеводороды). В рамках этого проекта проводятся ежемесячные круглогодичные отборы проб воды и взвеси в нижнем течении реки. Ежемесячный отбор проб позволяет получить надежные результаты в условиях сильной сезонной изменчивости стока реки и концентраций всех изучаемых элементов и компонентов (Коченкова, Новигатский, Гордеев, 2018; Гордеев и др., 2018).

Данная работа посвящена результатам первых трех лет работы Обсерватории (с мая 2015 г. по ноябрь 2017 г.). В статье представлены результаты ежемесячных измерений концентраций взвешенного вещества, взвешенного и растворенного органического углерода в нижнем течении реки.

### **Материалы и методы исследования**

Район исследований включает дельту Северной Двины. Пробы поверхностной воды отбирались каждый месяц на двух станциях нижнего течения реки: с причалов в черте горда Архангельска (Яхт-клуб) и в полукилометре выше по течению от

порта Экономия в протоке Кузнечиха (в сумме 56 проб за период с 2015 по 2017 гг.). Схема расположения станций показана на рис 2.

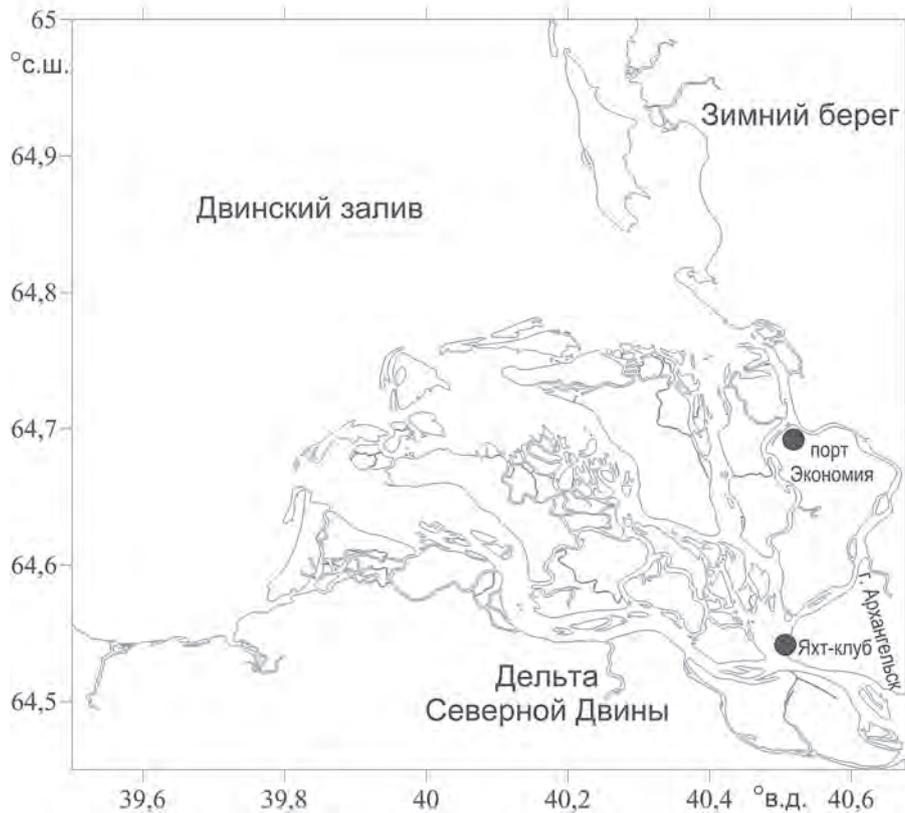


Рис. 2. Расположение станций отбора проб воды: станция Яхт-клуб и вблизи порта Экономия

Поверхностные пробы отбирались пластиковым ведром на капроновом фале. В тот же день вода фильтровалась для определения массовой концентрации (мг/л) взвеси и дальнейшего изучения ее состава. Фильтрация воды объемом 0,25–0,5 л на устьевых станциях проводилась под вакуумом 0,4 атм через мембранные ядерные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0,45 мкм производства ОИЯИ, г. Дубна на фильтрационных воронках фирмы Sartorius. Каждая проба фильтровалась через три параллельных ядерных фильтра для надежного определения среднего значения. После фильтрации морской воды фильтры промывались деионизованной водой и высушивались в сушильном шкафу при температуре +50°C в чистых пластиковых чашках Петри. Концентрацию взвеси определяли взвешиванием с точностью до 0,01 мг по разнице весов между фильтром с взвесью и его весом до фильтрации.

Для определения содержания взвешенного углерода взвесь фильтровали через прокаленные при температуре 450°C стекловолокнистые фильтры GF/F «Whatman» с условным диаметром пор 0,7 мкм под вакуумом 0,2 атм. Далее фильтры высушивались и отправлялись на анализ в лабораторию ИО РАН. Содержание ВОРУ определяли на анализаторе углерода АН-7529М.

Для определения растворенного органического углерода фильтрат отбирался в 30 мл флаконы HDPE и подкислялся соляной кислотой до pH 2 и хранился при температуре +2–3°C до последующего анализа в стационарной лаборатории. Концентрация РОУ определялась методом высокотемпературного сжигания на анализаторе углерода фирмы Shimadzu в ИО РАН. Погрешность прибора – ±1%. Воспроизводимость результатов анализа – ±5%.

### Взвесь

Для водосбора Северной Двины характерна длительная зима (5–6 месяцев), которая наступает во второй–третьей декаде ноября. Весеннее половодье начинается обычно в конце апреля с максимумом в начале–середине мая (5–15 мая) и заканчивается 10–20 июня. Во время холодного лета (2–3 месяца) довольно часты дожди и возможны заморозки. Осень соответствует началу сентября (Бреховских, Волкова, Колесниченко, 2003; Лисицын, 2010).

Полученные нами данные по концентрации взвеси на станциях Яхт-клуб и порт Экономия представлены на рис. 3, где отчетливо видны максимальные пики выноса взвеси в апреле–мае на протяжении всего периода наблюдений.

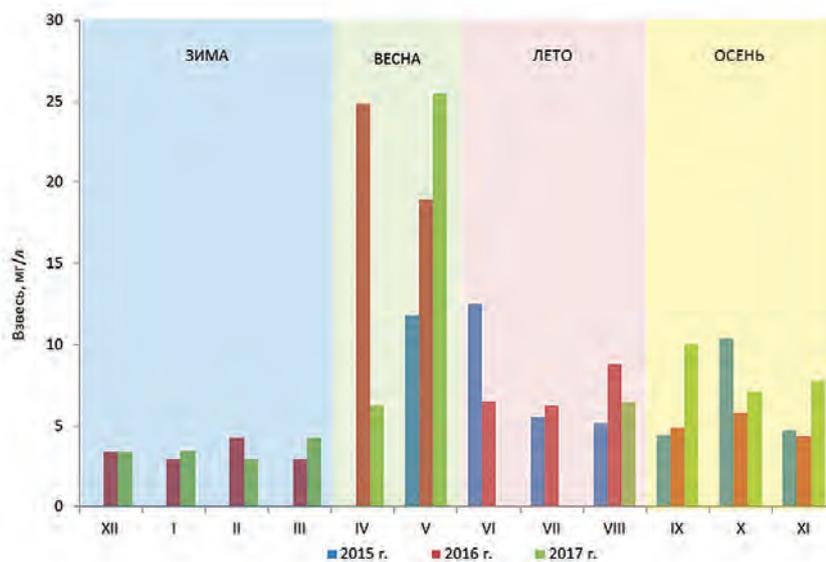


Рис. 3. Концентрация взвеси (мг/л) на станциях Яхт-клуб и вблизи порта Экономия с 2015 по 2017 гг. (даны средние значения для 2-х станций)

Концентрация взвеси в устьевых областях меняется, как известно, в зависимости от гидрологической ситуации. Основной сток взвешенных наносов в Белом море приходится на половодье (рис. 4), превышая меженный в 1,5–2 и более раз. Сток становится минимальным в марте, когда истощаются запасы подземных вод (Кравчишина, 2010).

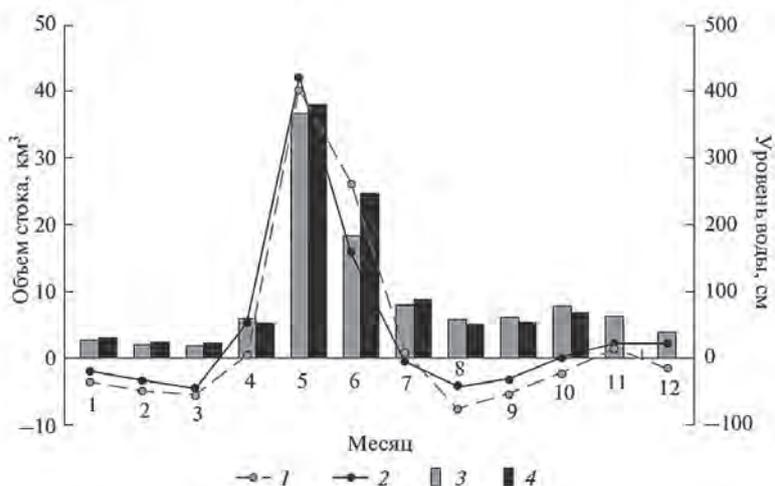


Рис. 4. Внутригодовое распределение уровней и стока в устьевой области р. Северной Двины: 1 – уровень у пос. Усть-Пинега, среднемноголетние данные, 2 – уровень у пос. Усть-Пинега, 2004 г., 3 – объем стока у пос. Усть-Пинега, 1881–1980 гг., 4 – объем стока у пос. Усть-Пинега, 2004 г. по (Кравчишина и др, 2010)

В течение всего зимнего периода концентрация взвеси мало изменяется, составляя в среднем 3,4 мг/л, с минимальными концентрациями 1,5 мг/л в декабре 2015 г. (Рис. 3). В конце зимней межени массовая концентрация взвеси в устье была сравнительно низкая: от 1,5 до 5 мг/л, в апреле до начала половодья она оставалась примерно на таком же уровне (3,5–6,3 мг/л), и была ниже значений летне-осеннего периода.

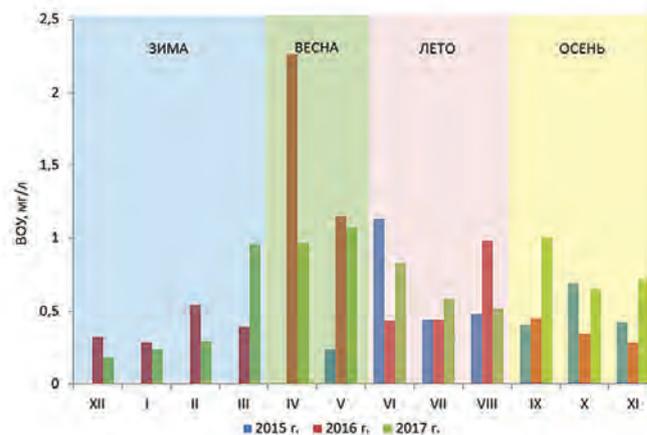
По литературным данным, средние значения концентрации взвеси в половодье р. Северная Двина варьируют от 9 до 16 мг/л (2000–2006 гг.) (Шевченко и др., 2007, 2008; Shevchenko, 2005; Гордеев и др., 2012). В исследуемый нами период во время половодья массовая концентрация взвеси в устье Северной Двины заметно увеличивалась и варьировалась в широких пределах от 8,76 до 46 мг/л, составляя в среднем около 20 мг/л., и приближалась к среднегодовому значению, установленному для рек российской Арктики: около 36 мг/л. Наиболее высокие ее значения (29,1–46,8 мг/л) были отмечены на станции порт Экономия в конце апреля – начале мая 2016 г. с наступлением ледохода. Такие высокие концентрации в конце апреля связаны с тем, что апрель 2016 г. на территории Архангельской области характеризовался повышенным температурным режимом, ускоренным снеготаянием, оттаиванием почвы и ранним возобновлением вегетации. В первой и второй декадах проходило разрушение снежного покрова. Положительные температуры воздуха днем и осадки в виде дождя способствовали снеготаянию. К середине апреля снег сошел с полей в большинстве районов области, что раньше средних многолетних сроков на 1–2 недели. Ледоход в водосборном бассейне р. Северная Двина прошел на 7–20 дней ранее среднемноголетних сроков. Средняя месячная температура воздуха была от +2,4° до +5,3° тепла, что выше нормы на 3–5°C (Обзор гидрометеорологических условий в апреле 2016, <http://www.sevmeteo.ru/weather/gidro/2689/>).

В послепаводковый период (июнь 2015, 2016 гг.) массовая концентрация взвеси составляла примерно 12,5 и 6,5 мг/л соответственно, а во время летней межени (август 2015–2017 гг.) она уменьшилась в 3–4 раза, по сравнению с половодьем, достигая в среднем 6,8 мг/л. В осенний период наблюдается повышение концентраций взвеси до 10,3 мг/л, что связано с дождевыми паводками в водосборном бассейне.

### Взвешенный органический углерод (ВОУ)

Полученные данные по концентрации ВОУ, выраженные в мг/л и в % на сухую взвесь, на станциях Яхт-клуб и порт Экономия представлены на рис. 5, где даны средние значения для 2-х станций. Концентрации  $C_{орг}$  в мг/л составляют в среднем 0,65 мг/л на станции Яхт-клуб и 0,98 мг/л в порту Экономия (рис. 5а). Максимальные концентрации так же, как для взвеси, приходятся на апрель 2016 г., составляя 2,68 мг/л. Распределение концентрации ВОУ в мг/л по месяцам в целом повторяет распределение взвеси, показанные и описанные на рис. 3.

а)



б)

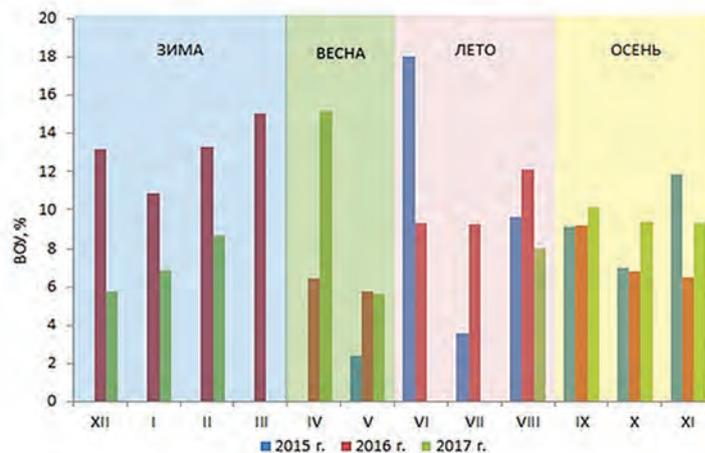


Рис. 5. Концентрации ВОУ, мг/л (а) и содержание ВОУ, % (б), на станциях Яхт-клуб и вблизи порта Экономия с 2015 по 2017 гг. (даны средние значения для 2-х станций)

Процентное содержание  $VOU$  во взвеси в среднем за три года составляет 8,5%, что совпадает с его содержанием во взвеси рек Мира (содержанием  $C_{орг}$  во взвеси рек с мутностью  $<15$  мг/л составляет около 8,4% (Ittekkot, Laane, 1991)). Сезонный максимум, характерный для весенне-летнего периода, достигал 24,7%, что соответствует максимальному развитию планктона (рис. 5б). Однако такие высокие процентные содержания не характерны для предыдущих исследований, так в период с 2004 по 2006 гг. содержание органического углерода варьировалось с 1,24 по 3,96%, составляя в среднем 2,7% (Шевченко, Покровский, Филиппов и др., 2010).

Данные В.Е. Артемьева с соавторами показывают, что процентное содержание  $C_{орг}$  в летне-осенний период в поверхностных водах р. Северная Двина в среднем составляет 15%, а в отдельных пробах достигает 52%. (Артемьев, Лазарева, Иджиян, 1984). Однако наши данные оказываются для сравниваемого интервала заметно более низкими, в среднем около 8,8%  $C_{орг}$  и максимумом 24,7%, что практически в 2 раза ниже данных, упомянутых авторов.

Обращает на себя внимание достаточно постоянное в течение года содержание  $C_{орг}$  во взвеси, что указывает на устойчивое поступление органики из бассейна водосбора во все сезоны, включая зимний.

### Растворенный органический углерод (РОУ)

По данным литературы, концентрация РОУ в воде Северной Двины колеблется в достаточно узком диапазоне – от 12 до 20 мг/л (Артемьев, Лазарева, Иджиян, 1984; Rokrovsky et al., 2010; Гордеев, 2012; Johnston et al., 2018), что в 2–3 раза превышает среднее глобальное значение – 5,75 мг/л (Meubeck, 1982). Причиной более высоких концентраций является особенность бассейна водосбора (широкое развитие болот, растительность, почвы и т.д.).

Трехлетние исследования показали, что различия между двумя точками мониторинга незначительны: для Яхт-клуба среднее значение составляет 15,4 мг/л, для порта Экономия 16,5 мг/л. Содержание РОУ в исследованных нами пробах варьирует в диапазоне 5,2–29,2 мг/л, составляя в среднем за три года 15,3 мг/л ( $n=56$ ). В работе (Johnston et al., 2018) в пробах, отобранных в 2013–2016 гг., концентрации РОУ изменяются от 4,03 до 20,12 мг/л (среднее за три года 12,43 мг/л при  $n=38$ ), что очень близко к полученным нами значениям.

Средняя концентрация РОУ в период с мая по декабрь 2015 г. (16,6 мг/л) чуть выше, чем в 2016 г. (15,7 мг/л) (рис. 6). Надо отметить, что в период зимней межени (с декабря по март) в 2016 г. концентрация РОУ была достаточно высокой 21,6 мг/л, что связано с аномально теплой зимой (см. раздел взвесь), однако в 2017 г. эти параметры в 3 раза ниже и составили в среднем 7,4 мг/л (рис. 6).

Несмотря на большую разницу в концентрации РОУ в 2016 и 2017 гг. в зимний период, можно проследить общую тенденцию изменения концентраций от месяца к месяцу. Так, в декабре средняя концентрация РОУ составила 27,7 и 11,2 мг/л (в 2016 и 2017 гг. соответственно). Далее концентрация снижалась на протяжении всего периода ледостава (в январе – 25,4 и 6,8 мг/л, в феврале – 19,9 и 6,4 мг/л, в марте

– 13,5 и 5,2 мг/л) и стала возрастать только к началу весеннего половодья в конце апреля (16,4 и 7,5 мг/л) (рис. 6).

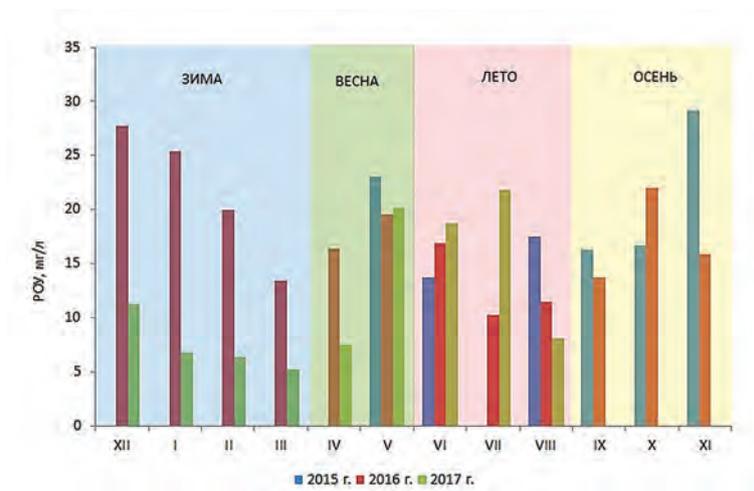


Рис. 6. Концентрация РОУ (мг/л), на станциях Яхт-клуб и вблизи порта Экономия с 2015 по 2017 гг. (даны средние значения для 2-х станций)

В работе американских коллег (Johnston et al., 2018) эта тенденция также прослеживается в 2013–2016 гг.: высокие средние концентрации пришлись на период начала ледостава с конца октября до января (среднее 12,74 мг/л, при n=8). Далее концентрация снижалась до 7,44 мг/л к середине апреля, максимальные средние концентрации РОУ пришлись на период половодья (14,63 мг/л, при n=17).

В работе (Pokrovsky et al., 2010) показано, что концентрация РОУ в воде Северной Двины в 2007 г. была на 30% ниже зимой и летом по сравнению с весной. Если в 2016 г. наблюдается иная картина распределения РОУ по сезонам, то ситуация в 2017 г. близка к той, что наблюдалась в 2007 г. Вероятно, ситуация меняется от года к году и требуются новые наблюдения.

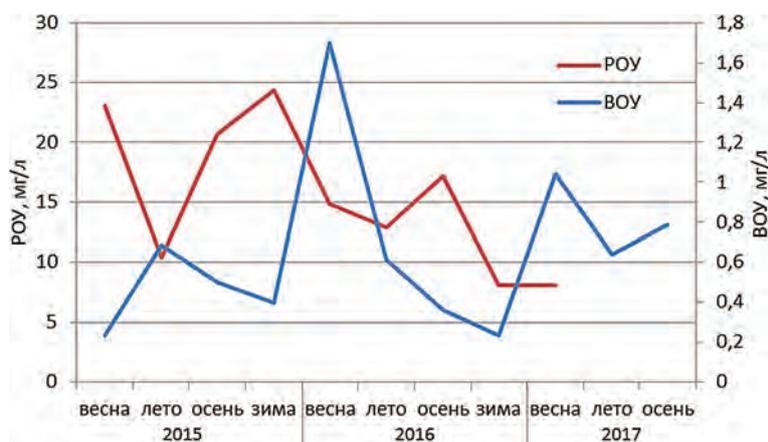


Рис. 7. Годовой ход концентраций РОУ и БОУ (мг/л) на исследовательской станции «Обсерватория – Маргинальный фильтр реки Северная Двина» в период с 2015 по 2017 гг.

Сравнение концентраций РОУ и ВОУ по соответствующим станциям (средние значения для 2-х станций) и разным сезонам показало (рис. 7), что зимой идет резкое увеличение РОУ (24 мг/л), что связано с преобладающим питанием Северной Двины болотными водами, а ВОУ достигает своей минимальной отметки (0,25 мг/л) в годовом цикле. Однако в весенне-летний сезон значительно увеличивается концентрация ВОУ (1,7 мг/л) за счет паводка, цветения планктона и интенсивных атмосферных осадков, при этом РОУ существенно уменьшается, снижаясь до минимальных годовых значений (7,0 мг/л).

### Выводы

В период с 2015 по 2017 гг. на исследовательской станции «Обсерватория – Маргинальный фильтр реки Северная Двина» при месячном отборе проб в устьевой области реки Северная Двина показано, что средняя концентрация взвешенного вещества за трехлетний период составила 7,8 мг/л. Максимальные концентрации взвеси приходятся на период паводка и достигают 46 мг/л, а минимальные характерны для периода зимней межени – до 1,5 мг/л, что соответствует максимальному и минимальному речному стоку.

Распределение концентрации ВОУ, выраженной в мг/л, в течение года повторяет распределение взвеси и в среднем за три года составляет 0,82 мг/л, с максимальным значением в паводок 2,6 мг/л и минимальным 0,1 мг/л в зимний сезон. Содержание ВОУ в процентах на сухую взвесь в среднем за три года составило 8,5%. Сезонный максимум отмечен в весенне-летний период – 24,7%, а минимум – 1,2% зимой.

Содержание РОУ при осреднении для двух станций варьирует в диапазоне 5,2–29,2 мг/л, составляя в среднем за три года 15,3 мг/л, что в 3 раза превышает среднее глобальное значение для рек Мира – 5,75 мг/л. Установлена тенденция увеличения РОУ и уменьшения ВОУ зимой, а летом обратная тенденция.

Авторы выражают благодарность академику А.П. Лисицыну и В.П. Шевченко за поддержку и ценные советы, аналитикам Л.В. Деминой и В.Ю. Гордееву. Обработка и получение материала выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 14-27-00114-П. В рамках Государственного задания ИО РАН по теме № 0149-2018-0016 и Программы ПП РАН 49.1.2. (тема № 0149-2018-0031) осуществлялась интерпретация полученных данных.

### Литература

- Артемов В.Е., Лазарева Е.В., Иджиян М.Г. Органическое вещество в эстуарии р. Северной Двины // Литология и полезные ископаемые. 1984. № 5. С. 51–57.
- Бергер В.Я., Наумов А.Д. История освоения и изучения Белого моря // Белое море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. Ч.1. СПб: ЗИН РАН, 1995. С. 7–40.
- Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Колесниченко Н.Н. Проблемы качества поверхностных вод в бассейне Северной Двины. М.: Наука, 2003. 233 с.

- А.И. Коченкова, А.Н. Новигатский, В.В. Гордеев, В.Б. Коробов, С.К. Белоруков, А.С. Лохов, А.Е. Яковлев
- Брызгалов В.А., Иванов В.В., Нечаева С.А.* Экологическое состояние низовья и устья р. Северная Двина и его изменения в условиях антропогенных воздействий // Проблемы Арктики и Антарктики. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. Вып. 73. С. 135–152.
- Гордеев В.В.* Геохимия системы река – море. М.: ип Матушкина Н.И., 2012. 452 с.
- Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
- Гордеев В.В.* Система река–море и ее роль в геохимии океана // Дис. докт. геол.-мин. наук. М: Ин-т океанологии РАН, 2009. 240 с.
- Гордеев В.В., Филиппов А.С., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Покровский О.С., Шевченко В.П., Дара О.М.* Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря. Т. 2: Водная толща и взаимодействующая с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 225–308.
- Гордеев В.В., Чульцова А.Л., Коченкова А.И., Белоруков С.К., Чупакова А.А., Морева О.Ю., Неверова Н.В., Чупаков А.В.* Сезонные вариации концентраций растворенных неорганических форм биогенных элементов в нижнем течении Северной Двины и в зоне смешения речных и морских вод // Вода: химия и экология. 2018. № 4–6. С. 75–85.
- Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В.* Распределение взвеси в маргинальном фильтре Северной Двины в конце лета // Успехи современного естествознания. 2018. № 2. С. 106–112.
- Кравчишина М.Д., Шевченко В.П., Филиппов А.С., Новигатский А.Н., Дара О.М., Алексеева Т.Н., Бобров В.А.* Вещественный состав водной взвеси устья реки Северной Двины (Белое море) в период весеннего половодья // Океанология. 2010. Т. 50. № 3. С. 396–416.
- Лещев А.В., Мискевич И.В., Коробов В.Б., Лохов А.С., Чульцова А.Л., Хоменко Г.Д., Белоруков С.К., Яковлев А.Е.* Пространственные особенности приливной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик устьевой области реки Северная Двина в зимнюю межень // Океанология. 2017. Т. 57. № 2. С. 303–310.
- Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Лисицын А.П.* Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 159–224
- Лисицын А.П.* Процессы в водосборе Белого моря: подготовка, транспортировка и отложение осадочного материала, потоки вещества, концепция «живого водосбора» // Система Белого моря. Т. I: Природная среда водосбора Белого моря / Под ред. А.П. Лисицына, И.А. Немировской, В.П. Шевченко. М.: Научный мир, 2010. С. 353–445.
- Михайлов В. Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 232 с.
- Обзор гидрометеорологических условий в апреле 2016 года на территории Архангельской области. URL: <http://www.sevmeteo.ru/weather/gidro/2689/> (дата обращения: 28.03.2018 г.).
- Система Белого моря. Т. I: Природная среда водосбора Белого моря / Под ред. А.П. Лисицына, И.А. Немировской, В.П. Шевченко. М.: Научный мир, 2010. 480 с.
- Система Белого моря. Т. II: Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера Белого моря / Под ред. А.П. Лисицына, И.А. Немировской. М.: Научный мир, 2012. 784 с.
- Система Белого моря. Т. III: Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнения. / Под ред. А.П. Лисицына, И.А. Немировской. М.: Научный мир, 2013. 668 с.

- Система Белого моря. Т. IV: Процессы осадкообразования, геология и история. / Под ред. А.П. Лисицына, И.А. Немировской, В.П. Шевченко, В.Г. Воронцова. М.: Научный мир, 2017. 1030 с.
- Федоров Ю.А., Овсяян А.Э., Лисицын А.П., Доценко И.В., Новигатский А.Н., Шевченко В.П. Закономерности распределения ртути в донных отложениях по разрезу река Северная Двина – Белое море // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436. № 1. С. 99–102.
- Федоров Ю.А., Овсяян А.Э., Коробов В.Б. Особенности распределения, миграции и трансформации ртути в водах устьевой области р. Северная Двина // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 85–92.
- Филатов Н.Н., Толстиков А.В., Богданова М.С., Литвиненко А.В., Менишуткин В.В. Создание информационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбора // Арктика: экология и экономика. 2014. Вып. 3 (15). С. 18–29.
- Шевченко В.П., Филиппов А.С., Богунов А.Ю., Гоголицын В.А., Лецев А.В., Толстиков А.В. Геохимические исследования взвеси в маргинальном фильтре реки северная Двина в конце зимнего периода // Вестник Архангельского гос. техн. ун-та. (Прикладная геоэкология). 2007. Вып. 70. С. 164–176.
- Шевченко В.П., Филиппов А.С., Богунов А.Ю., Гордеев В.В., Демина Л.Л., Лебедев А.А., Лецев А.В., Морева О.Ю., Насекина А.А., Скибинский Л.Э., Яковлев А.Е. Геохимические исследования снега, льда и воды в устьевой зоне реки Северной Двины в феврале 2006 г. // Вестник Архангельского гос.техн. ун-та. (Прикладная геоэкология). 2008. Вып. 74. С. 118–135.
- Шевченко В.П., Покровский О.С., Филиппов А.С., Лисицын А.П., Бобров В.А., Богунов А.Ю., Завернина Н.Н., Золотых Е.О., Исаева А.Б., Кокрятская Н.М., Коробов В.Б., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Политова Н.В. Об элементном составе взвеси реки Северная Двина (бассейн Белого моря) // Доклады РАН. 2010. Вып. 430. № 5. С. 686–692.
- Шевченко В.П., Широкова Л.С., Здоровеннов Р.Э., Новигатский А.Н., Покровский О.С., Политова Н.В. Распределение растворенного органического углерода в маргинальном фильтре реки Кеми (Белое море) в летний период // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием. 10–14 сентября 2012 г. г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. С. 279–282.
- Ittekkot V., Laane R.W.P. Fate of riverine particulate organic matter // Biogeochemistry of Major World Rivers. E. Degens, S. Kempe, Y. Richey-eds. SCOPE-UNE. 1991. P. 1–12.
- Johnston S. E., Shorina N., Bulygina E., Vorobjeva T., Chupakova A., Klimov S. I., Kellerman A.M., Guillemette F., Shiklomanov A., Podgorski D., Spencer R. G. M. Flux and seasonality of dissolved organic matter from the Northern Dvina (Severnaya Dvina) River, Russia // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2018. P. 1–16.
- Lisitzin A.P. The continental-ocean boundary as a marginal filter in the World Ocean // Biochemical cycling and sediment ecology. Eds. J.S. Gray et al. Dordrecht: Kluwer, 1998. P. 69–109.
- Meybeck M. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers // American Journal of Science. 1982. Vol. 282. P. 401–450.
- Pokrovsky O.S., Viers J., Shirokova L.S., Shevchenko V. P., Dupré B., Filippov A. S. Dissolved suspended and colloidal fluxes of organic carbon, major and trace elements in the Severnaya Dvina river and its tributary // Chem. Geology. 2010. Vol. 273. P. 136–149.

А.И. Коченкова, А.Н. Новигатский, В.В. Гордеев, В.Б. Коробов, С.К. Белоруков, А.С. Лохов, А.Е. Яковлев

*Shevchenko V.P., Filippov A.S., Novigatsky A.N., Skibinskiy L.E., Leschev A.V., Alexankina S.P., Korobov V.B., Vasilyev Yu.L., Sedelkova V.B., Grishman V.T.* Suspended particulate matter dynamics in the Northern Dvina delta, the White Sea, during the flood // *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*. 2005. No. 506. P. 104–107.

## FEATURES OF SEASONAL DISTRIBUTION OF A SUSPENDED MATTER AND ORGANIC CARBON ACCORDING TO «MARGINAL FILTER OF THE RIVER SEVERNAYA DVINA» OBSERVATORY

**Kochenkova A.I., Novigatsky A. N., Gordeev V.V., Korobov V.B., Belorukov S.K., Lohov A.S., Yakovlev A.E.**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: [kochen.a@mail.ru](mailto:kochen.a@mail.ru)*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

The results of the first three years of work in the frames of the project «Observatory –the Marginal Filter of Severnaya Dvina River» are presented. The main aim of this project is the regular investigations of sedimentological, geochemical and biological processes in the Severnaya Dvina River lower flow. The samples of surface water were taken every month during three years in two points in the Arkhangelsk city (Yacht-club) and in the port Economya. On the basis of collected by authors of the materials concentration of a suspended matter (SPM), the particulate organic carbon (POC) and the dissolved organic carbon (DOC) during different seasons of year. It is shown that the maximal concentration of a suspended matter on the period of a spring flood and reach 46 mg/l, and minimum are characteristic of the period of a winter low water – to 1,5 mg/l that corresponds to the maximal and minimum river drain. Average concentration of a suspended matter for the three-year period made 7,8 mg/l. Distribution of concentration of POC expressed in mg/l within a year repeats distribution of a suspended matter, and in three years averages 0,82 mg/l. The maintenance of POC expressed in % in three years averaged 8,5% the Seasonal maximum is noted during the spring and summer period when it reached 24,7%. The maintenance of DOC varies in the range of 5,2 – 29,2 mg/l, averaging 15,3 mg/l in three years that by 3 times exceeds mean global value – 5,75 mg/l.

**Keywords:** Severnaya Dvina, suspended matter, suspended and dissolved organic carbon, marginal filter

### References

- Artemiev V.E., Lazareva E.V., and Idzhyan M.G.* Organicheskoe veshhestvo v ehstuarii r. Severnoj Dviny (Organic matter in the estuary of the Severnaya Dvina river). *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1984, Vol. 5, pp. 51–57.
- Berger V.Ya. and Naumov A.D.* Istoriya osvoeniya i izucheniya Belogo morya (History of development and study of the White Sea). Beloe more. Biologicheskij resursy i problemy ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya. P.I. S-Peterburg: ZIN RAS, 1995, pp. 7–40.
- Brekhovskikh V.F., Volkova Z.V., and Kolesnichenko N.N.* Problemy kachestva poverkhnostnykh vod v bassejne Severnoj Dviny (Problems of surface water quality in the Severnaya Dvina basin), Moscow: Nauka, 2003, 233 p.

- Brizgalo V.A., Ivanov V.V., and Nechayev S.A. Ehkologicheskoe sostoyanie nizov'ya i ust'ya r. severnaya Dvina i ego izmeneniya v usloviyakh antropogennykh vozdeystvij. Problemy Arktiki i Antarktiki (Ecological condition of the lower reach and ostium of the Severnaya Dvina river and its changes in conditions of anthropogenic influences), Problemy Arktiki i Antarktiki, S-Peterburg: Gidrometeoizdat, 2002, Release 73, pp. 135–152.
- Filatov N.N., Tolstikov A.V., Bogdanova M.S., Litvinenko A.V., and Menshutkin V.V. Sozdanie informatsionnoj sistemy i ehlektronnoogo atlasa po sostoyaniyu i ispol'zovaniyu resursov Belogo morya i ego vodosbora, *Arktika: ehkologiya i ehkonomika*, 2014, Vol. 3 (15), pp. 18–29.
- Fedorov YU.A., Ovsepyan A.EH., and Korobov V.B. Osobennosti raspredeleniya, migratsii i transformatsii rtuti v vodakh ust'evoy oblasti r. Severnaya Dvina (Features of distribution, migration and transformation of mercury in waters of estuarial area of the Severnaya Dvina river). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, No. 4, pp. 85–92.
- Fedorov Y.A., Ovsepyan A.E., Dotsenko I.V., Lisitzin A.P., Novigatskii A.N., and Shevchenko V.P. Zakonomernosti raspredeleniya rtuti v donnykh otlozheniyakh po razrezu reka Severnaya Dvina Beloe more (Patterns of mercury distribution in bottom sediments along the Severnaya Dvina-White Sea section). *Doklady Earth Sciences*, 2011, Vol. 436, No. 1, pp. 51–54.
- Gordeev V.V. Rechnoj stok v okean i cherty ego geokhimii (River flow into the ocean and features of its geochemistry), Moscow: Nauka, 1983, 160 p.
- Gordeev V.V. Sistema reka-more i eyo rol' v geokhimii okeana (The river-sea system and its role in the geochemistry of the ocean). Doct. geol.-min. sciences, Moscow: Institute of Oceanology of the RAS, 2009, 240 p.
- Gordeev V.V. Geokhimiya sistemy reka-more (Geochemistry of the river-sea system). Moscow, IP Matushkina N.I., 2012, 452 p.
- Gordeev V.V., Filippov A.S., Kravchishina M.D., Novigatsky A.N., Pokrovsky O.S., Shevchenko V.P., and Dora O.M. Osobennosti geokhimii rechnogo stoka v Beloe more. (The geochemical peculiarities of the river discharge to the White Sea geosphere, System of the White Sea. T. 2: Water column and interacting with it atmosphere, cryosphere, the river runoff and the biosphere, Moscow: Scientific World, 2012, pp. 225–308.
- Gordeev V.V., CHul'cova A.L., Kochenkova A.I., Belorukov S.K., CHupakova A.A., Moreva O.YU., Neverova N.V., and Chupakov A.V. Sezonnnye variacii koncentracij rastvornykh neorganicheskikh form biogennykh ehlementov v nizhnem techenii Severnoj Dviny i v zone smesheniya rechnyh i morskikh vod. *Voda: himiya i ehkologiya*, 2018, No. 4–6, pp. 75–85.
- Ittekkot V. and Laane R.W.P. Fate of riverine particulate organic matter, Biogeochemistry of Major World Rivers. E. Degens, S. Kempe, Y. Richey-eds. SCOPE-UNE, 1991, pp. 1–12.
- Johnston S. E., Shorina N., Bulygina E., Vorobjeva T., Chupakova A., Klimov S. I., Kellerman A. M., Guillemette F., Shiklomanov A., Podgorski D., and Spencer R. G. M. Flux and seasonality of dissolved organic matter from the Northern Dvina (Severnaya Dvina) River, Russia, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, pp. 1–16.
- Kochenkova A.I., Novigatsky A.N., and Gordeev V.V. Raspredelenie vzvesi v marginal'nom fil'tre Severnoj Dviny v kontse leta (Distribution of suspended matter in the marginal filter of the Severnaya Dvina at the end of summer), *Advances in current natural sciences*, 2018, No. 2, pp. 106–112.
- Kravchishina M. D., Shevchenko V.P., Filippov A.S., Novigatsky A.N., Dara O.M., Alekseeva T.N., and Bobrov V.A. Veshhestvennyj sostav vodnoj vzvesi ust'ya reki Severnoj Dviny (Beloe more) v period vesennego polovod'ya (Material composition of SPM of the Severnaya

- Dvina river mouth (White Sea) during Spring flood), *Oceanologiya*, 2010, Vol. 50, No. 3, pp. 396–416.
- Leshchev A.V., Miskevich I.V., Korobov V.B., Lokhov A.S., Chultsova A.L., Khomenko G.D., Belorukov S.K., and Yakovlev A.E. Prostranstvennyye osobennosti prilivnoj izmenchivosti gidrologo-gidrokhimicheskikh kharakteristik ust'evoy oblasti reki Severnaya Dvina v zimnyuyu mezhen' (Spatial features of tidal variability of the hydrological and hydrochemical characteristics in the Northern Dvina River mouth area during the winter low-water period), *Oceanologiya*, 2017, Vol. 57, No. 2, pp. 270–277.
- Lisitsyn A.P. Marginal'nyj fil'tr okeanov (Marginal filter of oceans), *Oceanologiya*, 1994, Vol. 34, No. 5, pp. 735–747.
- Lisitzin A.P. (The continental-ocean boundary as a marginal filter in the World Ocean // Biochemical cycling and sediment ecology), Eds. J.S. Gray et al., Dordrecht: Kluwer, 1998, pp. 69–104.
- Lisitsyn A.P. Potoki osadochnogo veshhestva, prirodnye fil'try i osadochnye sistemy «zhivogo okeana» (Streams of sedimentary substance, natural filters and sedimentary systems of «the alive ocean»), *Geologiya i geofizika*, 2004, Vol. 45, No. 1, pp. 159–224.
- Lisitsyn A.P. Protsessy v vodosbore Belogo morya: podgotovka, transportirovka i otlozhenie osadochnogo materiala, potoki veshhestva, kontseptsiya «zhivogo vodosbora» (Processes in the catchment area of the White Sea: preparation, transportation and adjournment of sedimentary material, substance streams, concept of «an alive catchment area»), The White Sea system, Vol. I, Moscow, Scientific World, 2010, pp. 353–445.
- Mikhajlov V. N. Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashhee i budushhee (Mouths of the rivers of Russia and adjacent countries: last, real and future). Moscow: GEOS, 1997, 232 p.
- Meybeck M. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 1982, Vol. 282, pp. 401–450.
- Obzor gidrometeorologicheskikh uslovij v aprele 2016 goda na territorii Arkhangel'skoj oblasti (The review of hydroweather conditions in April, 2016 in the territory of the Arkhangelsk region), Electronic URL resource: <http://www.sevmeteo.ru/weather/gidro/2689/> (last accessed in 28.03.2018).
- Pokrovsky O.S., Viers J., Shirokova L.S., Shevchenko V. P., Dupré B., and Filippov A. S. Dissolved, suspended and colloidal fluxes of organic carbon, major and trace elements in the Severnaya Dvina river and its tributary. *Chem. Geology*, 2010, Vol. 273, pp. 136–149.
- Shevchenko V.P., Filippov A.S., Novigatsky A.N., Skibinskiy L.E., Leschev A.V., Alexankina S.P., Korobov V.B., Vaslyev Yu L., Sedelkova V.B., and Grishman V.T. Suspended particulate matter dynamics in the Northern Dvina delta, the White Sea, during the flood, *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*, 2005, No. 506, pp. 104–107.
- Shevchenko V.P., Filippov A.S., Bogunov A.Yu., Gogolitsyn V.A., Leshchev A.V., and Tolstikov A.V. Geokhimicheskie issledovaniya vzvesi v marginal'nom fil'tre reki severnaya Dvina v kontse zimnego perioda (Geochemical researches of suspended matter in the marginal filter of the Severnaya Dvina river at the end of the winter period), *Prikladnaya geoekologiya*, 2007, Vol. 70, pp. 164–176.
- Shevchenko V.P., Filippov A.S., Bogunov A.Yu., Gordeev V.V., Dyomina L.L., Lebedev A.A., Leshchev A.V., Moreva O.Yu., Nasekina A.A., Skibinsky L.E., and Yakovlev A.E. Geokhimicheskie issledovaniya snega, l'da i vody v ust'evoy zone reki Severnoj Dviny v fevrale 2006 g (Geochemical researches of snow, ice and water in an estuarial zone of the river of Severnaya Dvina in February, 2006). *Prikladnaya geoekologiya*, 2008, Vol. 74, pp. 118–135.

- Shevchenko V.P., Pokrovskij O.S., Filippov A.S., Lisitsyn A.P., Bobrov V.A., Bogunov A.YU., Zavernina N.N., Zolotykh E.O., Isaeva A.B., Kokryatskaya N.M., Korobov V.B., Kravchishina M.D., Novigatskij A.N., and Politova N.V.* Ob ehlementnom sostave vzvesi reki Severnaya Dvina (bassejn Belogo morya), *Doklady RAN*, 2010, Vol. 430, No. 5, pp. 686–692.
- Shevchenko V.P., Shirokova L.S., Zdorovenov R.E., Novigatsky A.N., Pokrovsky O.S., and Politova N.V.* Raspredelenie rastvorennogo organicheskogo ugleroda v marginal'nom fil'tre reki Kemi (Beloe more) v letnij period (Distribution of the dissolved organic carbon in the marginal filter of the Kemi River (White Sea) during the summer period, Materials V of the All-Russian symposium with the international participation, On September 10–14, 2012, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, Petrozavodsk: Karelian scientific center of RAS, 2012, pp. 279–282.
- System of the White Sea. Vol. I: Natural enviromental of the catchment area of the White Sea, Eds. A.P. Lisitsyn, Moskow: Scientific World, 2010, 480 p.
- System of the White Sea. Vol. II: Water column and interacting with it atmosphere, cryosphere, the river runoff and the biosphere, Eds. A.P. Lisitsyn, Moskow: Scientific World, 2012, 784 p.
- System of the White Sea. Vol. III: Dispersed sidementary hydrosphere material, microbial processes and pollution, Eds. A.P. Lisitsyn, Moskow: Scientific World, 2013, 668 p.
- System of the White Sea. Vol. IV: The processes of sedimentation, geology and history, Eds. A.P. Lisitsyn, Moskow: Scientific World, 2017, 1030 p.

## TRANSFORMATIONS OF NUTRIENTS IN THE NORTHEASTERN WATERS OF THE SAKHALIN SHELF: AN ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELING RESULTS

A.V. Leonov<sup>1</sup>, V.M. Pishchal'nik<sup>2</sup>, V.I. Petukhov<sup>3</sup>, O.V. Chicherina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences  
36, Nachimovskij Prospekt, Moscow, 117997, Russia*

<sup>2</sup>*Sakhalin State University, 290, Lenin Street, Uzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia*

<sup>3</sup>*Far Eastern Federation University, 8, Sukhanova St., Vladivostok, 690091, Russia  
e-mail: leonov@ocean.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.09.2018

Transformations of nutrients in marine environments of the Northeastern part of Sakhalin Shelf were studied in Regions 1–4. Three electronic devices were used for the analysis of the oceanographic information:

1. The GIS «Sakhalin Shelf» (to obtain data on the state of thermohaline parameters of sea waters).
2. The oceanic dynamic model of the Bergen University (to estimate the rates of water mass transport across boundaries of regions).
3. The hydroecological CNPSi-model (to calculate the chemical and biological characteristics and estimate qualitatively the features of the marine environment biohydrochemistry in various regions of Northeastern part of Sakhalin Shelf).

In this study the seasonal dynamics of the concentrations of organic and mineral substances of biogenic elements (N and P), and organism biomasses (heterotrophic bacteria, three groups of phytoplankton, and two groups of zooplankton are presented, which were reproduced on the basis of the long-term monthly values of the marine environment parameters (temperature, light intensity, transparency of water environment, biogenic load, water exchange parameters). Indicated organisms are involved in the substance transformations and providing their turnover in the water environment. An analysis of the changes in the nutrient concentrations allowed us to characterize the conditions during a year for the explanations of biomass organism development and change in values of their activity parameters (on the base of specific biomass growth rates and bioproductions).

**Keywords:** models for analysis of oceanological data; concentrations of nutrients; organism biomasses of lower trophic links – heterotrophic bacteria, three main groups of phytoplankton; herbivorous and predatory; specific growth rate, biomass turnover time, bioproduction

### Introduction

Presently, the main tasks of biohydrochemical research, solved with the help of mathematical modeling, are connected with the study of the dynamics of nutrient substances (BS), their chemical and biological transformation in the aquatic environment and in sediments, the rates of chemical and biological processes, the circulation of BS in natural waters, conditions the formation of bioproductivity of water bodies, the balance of organogenic compounds, the study of metabolic processes at the interfaces of river

runoff-sea, water-atmosphere and water-bottom. In the aquatic environment, physical, chemical and biological processes associated with the transformation and chemical-biological transformation of BS of natural and anthropogenic origin are carried out. When studying the composition of the components of the aquatic environment, these processes should be considered not in isolation, but in close interconnection. Therefore, the modern methodology for studying the composition of the components of natural waters is based on the principles of system analysis, combining the results of research on the basic natural disciplines (chemistry, physics, biology, geography, geology), as well as related sciences (biohydrochemistry, geochemistry, biophysics, micro- and hydrobiology).

The degree of complexity of model development is reflected in the received ideas about the subject, the study of certain issues of the composition of the components of natural waters, the availability of information on individual disciplines that study the state of water resources. The methodology of model development is based on a combination of deterministic description of chemical, biological and physical processes developing in the aquatic environment. The studied water bodies are subdivided into regions, each of which is studied separately. As a result, quantitative information on the changes in time of chemical and biological characteristics is obtained depending on the impact on the ecosystem of the water body of the habitat factors – temperature ( $T_w$ ), light intensity, water transparency, water regime, nutrient load (Leonov, 1999).

The research methodology in these studies is based on the application of third instruments for the analysis of oceanological data:

1. The GIS «Sakhalin Shelf» (Pishchal'nik, Bobkov, 2000) (for processing thermohaline observational data).
2. Hydrodynamic ocean model of the Bergen University (BOM) (Berntsen, 2004) (for calculations on thermohaline data of velocities and directions of currents and rates of water exchange).
3. The hydroecological CNPSi-model of transformation / turnover of BS (compounds of C, N, P, Si (Leonov, 2012) for calculating the dynamics of BS and biomass of organisms involved in their transformation). Instruments (1)–(3) are simultaneously used since 2007 to study the features of hydrodynamics of waters and biohydrochemistry of marine environments (Leonov et. al., 2010 a; b; 2016).

Calculations of currents for the Eastern Sakhalin Shelf were performed with the help of oceanic BOM model (Berntsen, 2004) for each month on the base of thermohaline parameter values (data accumulated in the GIS «Sakhalin Shelf» includes observations for 1948–1995 during the ice-free period at standard oceanographic stations in the offshore area of Sakhalin: for  $T_w$ –18359, water salinity–13480, values of water pH–4367, content of  $O_2$ –6176, of  $NO_2$ –1457, of P–1492, and of Si–1650 (Pishchal'nik, Bobkov, 2000)).

The following features of the dynamics of marine currents on the Northeastern Sakhalin Shelf (NESS) are revealed:

- the restructuring of the water circulation scheme in the surface 100-m layer of shelf in the annual cycle occurs twice: in May–June and September–October;

- the calculated velocities of marine currents under ice in the area of NESS fluctuate from 4 to 7 cm/s, and the maximum velocities of water movement on the surface are observed in November (22.5 cm/s) (Pischal'nik et al., 2014).

Calculated current rates are coincided with measured in observations [Luchin et al., 1998].

The hydroecological CNPSi-model (simulation model of the transformation of C, N, P, Si -substances (Leonov, 2012)) calculates:

- instantaneous rates of changes in substance concentrations over all the considered transformation pathways;

- instantaneous concentrations of the state variables of the aquatic environment and bottom sediments in the studied ecosystem;

- turnover times of each chemical and biological state variables and the rates of biomass productions;

- substance fluxes through internal and external transformation pathways;

- complete balances of C, N, P, Si – substances for regions of the studied water area.

Calculations of the change in the substance concentrations were carried out for two years to assess the values of biohydrochemical parameters at the end of the first year corresponding to the average long-term environmental parameters. These values are taken as an initial concentrations, corresponding to the long-term environmental conditions, for the second year of calculations, to represent the seasonal dynamics of substance concentrations, biomass of organisms, an internal / external substance fluxes for the biohydrochemical characterizing of marine ecosystem behaviour depending on environmental conditions and anthropogenic influence (Leonov, 2012).

### **The short information for the hydroecological CNPSi-model**

The hydroecological CNPSi-model (Leonov, 2012) is the formalized description of the interrelated biohydrochemical cycles of N- and P-substances, the most important processes of transformation of dissolved organic C (DOC), Si, O<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub> in a two-layered water system. The model is intended to study the effect on the marine ecosystem of the main natural and anthropogenic factors ( $T_w$ , light intensity, transparency of the water environment, biogenic load, water exchange). Month variations of these factors regulate the rates of the BS concentration changes, as well as the biomass of biological compartments the marine environment. The CNPSi-model calculates the intra-annual variations in the concentrations of DOC and O<sub>2</sub>, detrital fractions of P (PD), N (ND), and Si (SiD), dissolved organic fractions of P (DOP), N (DON) and Si (DOSi), dissolved mineral forms of P (DIP), Si (DISi), and N (ammonium, NH<sub>4</sub>, nitrites, NO<sub>2</sub>, and nitrates, NO<sub>3</sub>). Changes in the concentrations of BS are determined by the activity of organisms of the lower trophic chains – heterotrophic bacteria (*B1*), three dominant phytoplankton groups (*F1*, *F2*, *F3*), and two zooplankton groups – herbivorous (*Z1*) and predatory (*Z2*) (Leonov, 2012).

The structure of CNPSi-model most fully meets the requirements for applied models for studying the conditions in the formation of water quality and the state of

marine ecosystems. The peculiarity of the model is the explicit role of organisms in the mathematical description: in the biochemical oxidation of natural components, BS, and organic matter (OM) of the marine environment and pollutants, as well as in the cycle and regeneration of mineral compounds of biogenic elements (C, N, P, Si). The structure of the CNPSi-model equations was considered in (Leonov, 2012).

The program of the model is written in REM-FORTRAN. Visualization of simulation results (data of calculations) is carried out using the built-in CNPSi-model of the display system, adapted for WINDOWS-XP (Leonov et al., 2012).

### Zoning of the water area of the Northeastern Sakhalin shelf

The entire water area of the NESS is divided into Regions 1–4 (Fig. 1). The morphometric parameters of these regions are presented in Table 1. Analysis of the oceanological parameters of the marine environment in the waters of the NESS (Fig. 1) made it possible to distinguish for Regions 1–4 their mean depths (640, 1520, 300 and 730 m, respectively). The smallest values of the water area and the water volume are in Region 2 (15 thousand km<sup>2</sup>) and in Region 3 (10.5 thousand km<sup>3</sup>), respectively. The values of water area and water volume are greatest in the Region 1: 48 thousand km<sup>2</sup> and 30.7 thousand km<sup>3</sup> respectively (Table 1).

The next information were used as initial data for the calculations on the CNPSi-model: the morphometric parameters of the selected Regions 1–4 (mean depths, areas and water volumes), concentrations of BS in the tributaries and adjacent water areas, the long-term values of the marine environment state (mean monthly values of water temperature ( $T_w$ ), light intensity, and the transparency of waters, as well as the values of water exchange (flow rates) between Regions 1–4 and open water areas of the Sea of Okhotsk. The water exchange parameters were calculated on the basis of the current indicators for the water areas of the NESS on the base of the oceanic model of the Bergen University (BOM) on the long-term observations for  $T_w$  and salinity ( $S_w$ ) of the sea waters of the NESS area.

The methodology for preparing the initial data for calculations on the CNPSi-model was used earlier in the study by modeling the transformation conditions for BS and spatial transport of substances in the marine waters washing the shores of Sakhalin Island (Pishchal'nik, Leonov, 2003; Leonov, Pishchal'nik, 2005 a, b; Leonov et al., 2010 a, b; Pishchal'nik, et al., 2011).

Table 1. Morphometric characteristics of the Regions 1–4 of NESS

Characteristic dimension	1	2	3	4
Mean depth, m	640	1520	300	730
Water area, thous. km <sup>2</sup>	48	15	35	18.7
Water volume, thous. km <sup>3</sup>	30.7	22.8	10.5	13.7

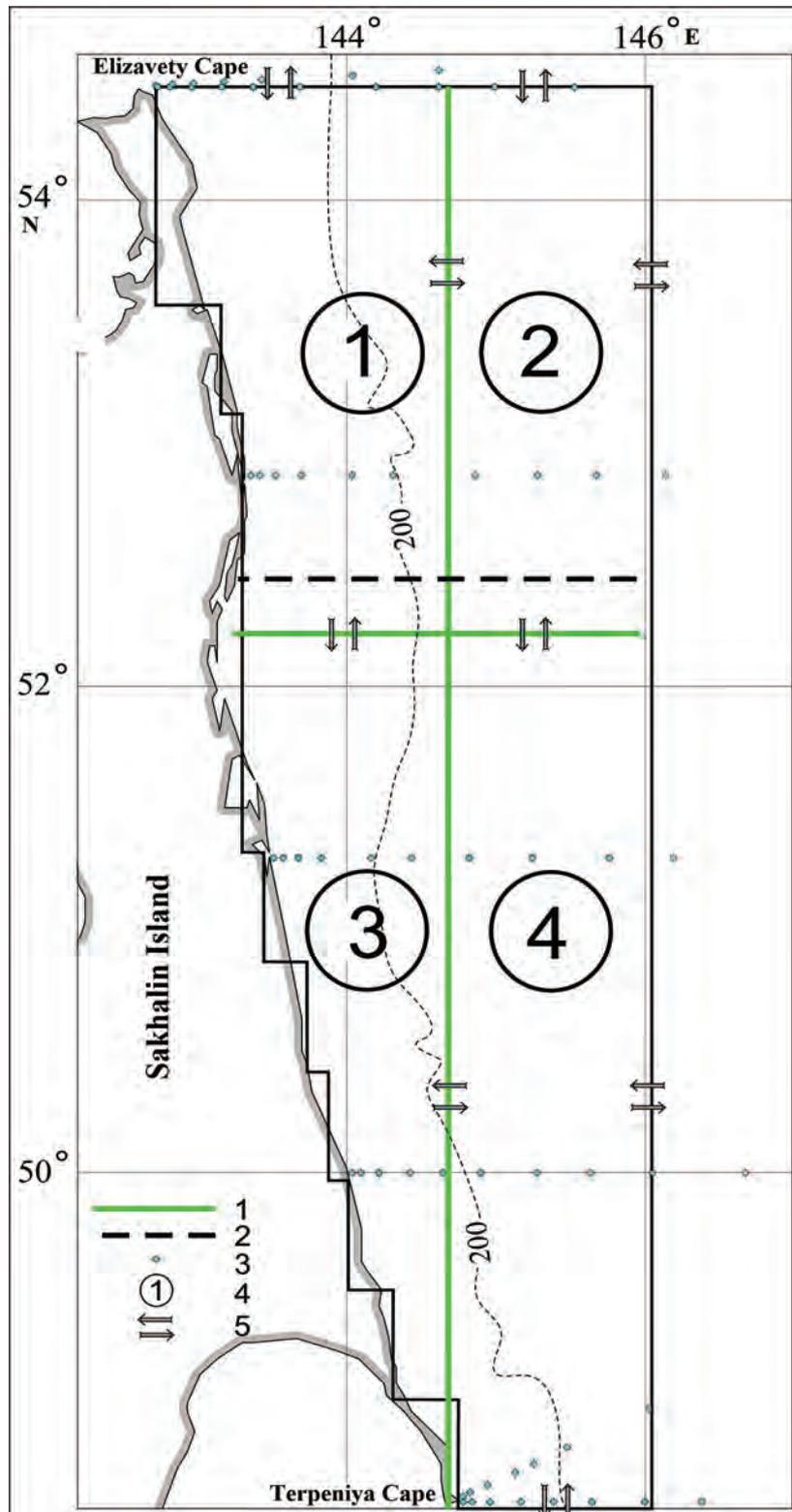


Fig. 1. Map-scheme of the water area of NESS (1 – the boundaries of Regions 1–4; 2 – the standard cross-section for 52°30' N; 3 – the location of standard stations in waters of NESS; 4 – numbers of regions; 5 – directions of water transfer through boundaries between regions and with open-waters of the Sea of Okhotsk

Table 2. Long-term values of marine environmental characteristics by month for Regions 1–4 of NESS (dash means that the layer was not chosen; here and in Table 3, the numbers above and below the line are for the top and bottom layers, respectively)

Region	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Depth of vertical mixing of water (XI–V) and termocline position (VI–X), m												
1–4	150	150	150	150	150	20	30	40	50	60	75	100
Water temperature, °C												
1	-0.8	-1.2	-1.3	-1.4	-1.1	1.7	4.6	5.4	6.2	3.7	1.1	0.0
	1.5	1.0	1.0	1.0	1.4	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.8	0.8
2	-0.6	-1.0	-1.2	-1.2	-0.9	3.1	6.5	6.7	6.9	4.1	1.2	0.1
	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.8	1.0	1.0	1.0	1.2	1.3	1.3
3	-0.6	-1.2	-1.4	-1.4	-1.1	2.4	4.8	5.5	6.1	4.0	1.9	0.2
	0.2	-0.2	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	-0.3	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.2
4	-0.4	-1.1	-1.3	-1.3	-0.9	3.0	5.7	6.0	6.3	4.3	2.0	0.3
	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.8
Light intensity, cal/(sm <sup>2</sup> day)												
1–4	90.3	114.2	167.8	213.4	219.4	240.0	219.4	206.5	200.0	128.8	120.0	90.3
Photoperiod, dimensionless												
1–4	0.32	0.39	0.48	0.60	0.66	0.71	0.69	0.62	0.54	0.48	0.34	0.32
Precipitation, km <sup>3</sup>												
1–2	1.113	0.894	0.978	1.492	1.956	1.834	2.760	3.191	3.583	2.702	1.692	1.608
3–4	1.575	1.143	1.134	1.253	1.609	1.524	2.269	2.379	2.642	2.261	2.159	2.057
Secchi depth, m												
1	1	1	1	1(0)	3	6	7	7	8	8	9	8
2	2	3	1	1	5	8	8	7	8	10	11	12
3	1	2	1	1(0)	6	7	8	7	8	8	9	10
4	1	1	1	1	8	7	8	7	8	10	10	12

The main seasonal features in changes of thermohaline parameters in the Regions 1–4 of the NESS are singled out. The analysis of the data on the vertical distribution of  $T_w$  in the waters of the NESS, performed with the help of GIS «Sakhalin Shelf», revealed a subdivision of the water column into two layers during a year [Pishchal'nik et al., 2014]: in the cold period, this is associated with the development of winter vertical water circulation processes, and in warm weather – with warming up surface layer. Accordingly, in Regions 1–4 during the cold period (January–May), the thickness of the surface layer with negative values of mean  $T_w$  ( $-0.4$ – $-1.4$  °C) reaches 150 m. It should be noted that the mean  $T_w$  of the subsurface layer during a year in Regions 2 and 4 remain low, but retain positive values (respectively 0.8–1.4 and 0.1–0.8 °C); in the Region 3, the

subsurface waters with the negative  $T_w$  ( $-0.1 \dots -0.7^\circ \text{C}$ ) is noted in February–August, and in the remaining months, the average  $T_w$  varies here within  $0.2\text{--}0.5^\circ \text{C}$ . In Region 1 in the subsurface layer, the average  $T_w$  has the lowest values in the period of June–August ( $-0.3$ ,  $0.0$ , and  $0.3^\circ \text{C}$ , respectively), in the remaining months of a year, the average values of  $T_w$  vary within the range of  $0.5\text{--}1.5^\circ \text{C}$  (Table 2).

In waters of Regions 1–4, the highest average values of  $T_w$  in the surface layer were recorded in September ( $6.2$ ,  $6.9$ ,  $6.1$ , and  $6.3^\circ \text{C}$ , respectively). The maximum warming of surface waters is recorded in open waters (Region 2), and the minimum – in the coastal Region 3 (as a result of the clearly pronounced upwelling of waters). In the spring–summer period, water heating does not extend to depths  $> 30$  m, and autumn mixing of water is accompanied by a decrease in the values of mean  $T_w$  of the upper quasihomogeneous layer (in October to  $3.7\text{--}4.3^\circ \text{C}$ , in November to  $1.1\text{--}2.0^\circ \text{C}$ , in December to  $0.0\text{--}0.3^\circ \text{C}$ ) and an increase in the thickness of this layer (up to  $60$ ,  $75$ , and  $100$  m, respectively) (Table 2).

During a year, the highest values of light intensity and photoperiod occur in May–July, while precipitation of atmospheric precipitation falls on August–September (Table 2).

The water transparency was estimated from the depth of visibility of the white Seki disk. Its values in the Regions 1–4 were selected from the reports on the separate expeditions of the Hydrometeorological Service and the fishing industry performed in various years. In Regions 1–4, the average values of the water transparency in individual months varied accordingly within the limits of  $1\text{--}9$ ,  $1\text{--}12$ ,  $1\text{--}10$ , and  $1\text{--}12$  m. The smallest average transparency values of water ( $1\text{--}2$  m) in these regions fall within the period January–April, and the highest values ( $10\text{--}12$  m) – in November–December (Table 2).

The values of total flow rates calculated with the help of BOM (Table 3, Appendix) determine the expressed bilateral water exchange through the boundaries between Regions 1–4 and with open water areas of the Sea of Okhotsk. The range of water flow rate values varies within one to three orders of magnitude, taking into account the fluctuations in the thickness of the separated upper and lower layers of water in different months.

The water transfer in January–May in the surface layer from Region 1 to Region 2 is characterized by water flow rate values of  $192.9\text{--}377.0 \text{ km}^3/\text{month}$ , in June–August it is weakening (water flow rate values are reduced to  $0.8\text{--}11.0 \text{ km}^3/\text{month}$ ), in the following months (September–December) – the water exchange is increasing (flow rate values increase to  $200.4\text{--}419.0 \text{ km}^3/\text{month}$ ). For most part of a year, the reverse water transfer in the surface layer (from Region 2 to Region 1) is more active: the periods January–May and June–September are characterized by flow rate values, respectively  $467.1\text{--}644.6$  and  $64.9\text{--}103.4 \text{ km}^3/\text{month}$ , and in October–December, the flow rate values are within  $232.2\text{--}412.5 \text{ km}^3/\text{month}$ , and comparable with the water transfer from Region 1 to Region 2. The intensity of the water transport in the lower layer (from Region 1 to Region 2 and backward transfer from Region 2 to Region 1) remains high throughout a year, as evidenced by fluctuations in different months of flow rate values – within  $1221.6\text{--}2126.5$  and  $1382.4\text{--}2094.5 \text{ km}^3/\text{month}$  (Table 3).

Table 3. Long-term monthly values of flow rates at the boundary of Regions 1–4 (NESS), exchange with outer waters of the Sea of Okhotsk, vertical transport, and river runoff (all – in km<sup>3</sup>/month)

Transport from	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1 → 2	<u>377.0</u> 1607.5	<u>313.3</u> 1739.6	<u>356.4</u> 1836.1	<u>304.9</u> 1773.3	<u>192.9</u> 2087.0	<u>6.1</u> 2126.5	<u>0.8</u> 1885.8	<u>11.0</u> 1794.6	<u>200.4</u> 1221.6	<u>253.6</u> 1304.6	<u>419.0</u> 1565.2	<u>284.6</u> 1450.2
2 → 1	<u>467.1</u> 1576.4	<u>500.0</u> 1629.7	<u>534.4</u> 1752.8	<u>553.3</u> 1625.8	<u>644.6</u> 1738.8	<u>98.0</u> 2094.5	<u>193.4</u> 1728.9	<u>163.2</u> 1675.0	<u>64.9</u> 1382.4	<u>232.2</u> 1440.4	<u>412.5</u> 1753.3	<u>357.7</u> 1521.8
3 → 1	<u>88.5</u> 9.0	<u>89.4</u> 0.3	<u>128.8</u> 0.2	<u>132.6</u> 0.7	<u>138.0</u> 0.2	<u>52.0</u> 143.6	<u>124.5</u> 130.4	<u>98.5</u> 112.8	<u>49.0</u> 149.4	<u>54.8</u> 307.2	<u>52.3</u> 209.9	<u>83.9</u> 118.3
1 → 3	<u>55.1</u> 49.3	<u>62.6</u> 78.3	<u>85.8</u> 114.3	<u>88.7</u> 118.5	<u>69.8</u> 138.5	<u>14.8</u> 159.9	<u>9.5</u> 174.4	<u>17.8</u> 107.6	<u>44.1</u> 79.9	<u>241.8</u> 97.2	<u>246.0</u> 79.2	<u>143.7</u> 78.4
4 → 2	<u>244.1</u> 417.4	<u>277.0</u> 416.1	<u>340.0</u> 468.9	<u>323.5</u> 495.5	<u>308.3</u> 524.1	<u>33.8</u> 672.1	<u>28.9</u> 830.1	<u>129.1</u> 452.2	<u>111.3</u> 443.9	<u>17.4</u> 711.9	<u>60.9</u> 696.7	<u>112.6</u> 632.6
2 → 4	<u>30.5</u> 643.3	<u>14.2</u> 632.6	<u>8.1</u> 730.5	<u>6.8</u> 737.2	<u>17.4</u> 799.5	<u>4.5</u> 752.8	<u>69.4</u> 901.2	<u>0.0</u> 716.6	<u>5.2</u> 663.7	<u>88.7</u> 680.6	<u>40.9</u> 648.3	<u>25.7</u> 708.9
3 → 4	<u>236.1</u> 310.6	<u>262.2</u> 178.6	<u>345.6</u> 152.8	<u>371.9</u> 148.8	<u>497.6</u> 108.7	<u>174.9</u> 533.0	<u>62.2</u> 425.5	<u>147.9</u> 515.1	<u>203.9</u> 515.5	<u>298.8</u> 637.8	<u>412.0</u> 716.9	<u>264.7</u> 636.2
4 → 3	<u>226.1</u> 265.3	<u>114.0</u> 234.1	<u>107.0</u> 277.9	<u>104.8</u> 303.5	<u>89.3</u> 458.2	<u>11.8</u> 676.0	<u>61.1</u> 460.7	<u>58.3</u> 645.1	<u>130.8</u> 625.9	<u>203.1</u> 724.0	<u>300.9</u> 732.2	<u>435.2</u> 404.7
Exchange with outer water area – from the Sea of Okhotsk												
1 → N	<u>387.8</u> 357.1	<u>361.0</u> 328.4	<u>354.1</u> 312.4	<u>375.8</u> 320.2	<u>493.3</u> 224.2	<u>73.8</u> 476.6	<u>265.0</u> 629.3	<u>284.4</u> 484.6	<u>174.8</u> 552.7	<u>154.9</u> 517.9	<u>302.3</u> 488.0	<u>340.5</u> 610.7
N → 1	<u>108.8</u> 757.2	<u>72.5</u> 736.0	<u>64.2</u> 733.8	<u>53.8</u> 757.3	<u>71.5</u> 822.3	<u>33.2</u> 674.3	<u>36.6</u> 1014.1	<u>58.8</u> 891.2	<u>64.1</u> 766.5	<u>145.7</u> 674.5	<u>151.0</u> 785.0	<u>75.6</u> 1018.3
2 → N+E	<u>600.5</u> 4661.7	<u>716.5</u> 4427.6	<u>581.0</u> 4601.3	<u>510.4</u> 4043.4	<u>499.4</u> 4287.4	<u>38.9</u> 4936.3	<u>5.8</u> 4832.6	<u>38.0</u> 4493.2	<u>216.7</u> 4108.8	<u>103.3</u> 4796.2	<u>327.6</u> 4900.6	<u>326.1</u> 4285.7
N+E → 2	<u>1127.6</u> 4339.7	<u>1042.6</u> 4263.3	<u>1030.7</u> 4029.1	<u>948.8</u> 3502.2	<u>1060.0</u> 4522.6	<u>130.6</u> 4703.0	<u>324.1</u> 4342.5	<u>293.0</u> 4019.9	<u>280.8</u> 3920.3	<u>457.6</u> 4297.2	<u>706.6</u> 4390.5	<u>741.1</u> 3758.8
4 → E+S	<u>1469.5</u> 2452.5	<u>1023.5</u> 2284.6	<u>1013.0</u> 2438.5	<u>976.6</u> 2375.2	<u>1282.8</u> 2596.4	<u>294.0</u> 4391.3	<u>344.0</u> 4377.9	<u>397.1</u> 4297.9	<u>646.4</u> 4041.6	<u>1190.8</u> 3593.5	<u>2072.4</u> 3150.0	<u>1676.0</u> 2502.1
E+S → 4	<u>595.5</u> 3307.0	<u>719.8</u> 2570.2	<u>847.8</u> 2582.5	<u>900.5</u> 2428.3	<u>1120.8</u> 2773.7	<u>290.3</u> 4377.4	<u>717.4</u> 3996.9	<u>927.3</u> 3773.7	<u>984.6</u> 3698.5	<u>644.3</u> 4096.5	<u>735.8</u> 4413.7	<u>629.6</u> 3502.0
Vertical transport in water area: («+») means upward, («-») means downward)												
1	+238.8	+45.8	-77.4	-86.9	-207.3	+12.8	-4.1	-57.5	+356.6	+311.5	+472.1	+529.3
2	-842.9	-901.9	-931.4	-870.4	-583.5	-68.7	-164.9	-230.4	-291.7	-350.9	-417.3	-553.8
3	-85.4	-49.9	-46.3	-35.6	+20.8	+260.9	+110.6	+144.9	+55.1	+65.4	+76.3	-156.2
4	+387.6	+166.6	+105.0	+94.7	+88.1	+77.7	+57.1	+21.7	+261.8	+374.0	+567.6	+649.0
River runoff – Tym' River												
3	0.048	0.035	0.036	0.094	0.935	0.511	0.177	0.164	0.187	0.228	0.109	0.067

The intensity of surface water transfer in different months in the coastal zone (from Region 3 to Region 1 and reverse transfer – from Region 1 to Region 3) is lower, and is characterized by fluctuations in water flow rates, respectively, within 52.0–138.0 and

9.5–246.0 km<sup>3</sup>/month. The water transfer from Region 3 to Region 1 in the lower layer in January–May is insignificant (fluctuations in flow rates are in the range 0.2–9.0 km<sup>3</sup>/month), and in June–December its intensity is significantly higher (their values are 112.8–307.2 km<sup>3</sup>/months). Reverse water transfer in the lower layer (from Region 1 to Region 3) is valid for a year and is characterized by fluctuations of flow rates in the range of 49.3–174.4 km<sup>3</sup>/months (Table 3).

The transfer of surface waters (at the border of Regions 3 and 4) during a year is more active from coastal Region 3 to Region 4 with fluctuations of flow rate (km<sup>3</sup>/month) values in November–May, June–August and September–October within 262.2–497.6, 62.2–174.9, and 203.9–298.8 respectively. Reverse transfer of surface waters (from Region 4 to Region 3) during the indicated periods of a year occurs at the water flow rates that vary within 89.3–435.2, 11.8–61.1, and 130.8–203.1 respectively. On the contrary, in the lower layer the intensity of the water transport during a year is generally higher from the Region 4 to Region 3 (the range of flow rate fluctuations in certain months is 234.1–732.2 km<sup>3</sup>/month) than the reverse water transfer from Region 3 to Region 4 (108.7–716.9 km<sup>3</sup>/month) (Table 3).

The transfer of surface waters in the moraine part of the NESS (at the border of Regions 2 and 4) is more intensive from Region 4 to Region 2 (with fluctuations in water flow rates in January–May, June–August and September–December, respectively, 244.1–340.0, 28.9–129.1, and 17.4–112.6 km<sup>3</sup>/month) in comparison with the reverse water transfer from Region 2 to Region 4 in the same periods of a year, however, it occurs more intensively from Region 2 to Region 4 (with fluctuations in water flow rates in individual months within 632.6–901.2 km<sup>3</sup>/month) than from Region 4 to Region 2 (416.1–830.12 km<sup>3</sup>/month) (Table 3).

During a year, there is also a bilateral water exchange through the boundaries of the NESS regions with open water areas of the Sea of Okhotsk. The calculations took into account the water flow rate values estimated with the help of BOM, which determine the water exchange in the North of the NESS (with Region 1), as well as the total water exchange in the North and East (with Region 2) and in the East and South (with Region 4).

The intensity of surface water transfer from Region 1 to the North from November to May is characterized by water flow rates of 302.3–493.3 km<sup>3</sup>/month; in June, the water transfer slows down (the water flow rate is reduced to 73.8 km<sup>3</sup>/month), and from July to October, the water exchange increases (at water flow rates of 154.9–284.4 km<sup>3</sup>/month). The reverse water transfer (from the North to the Region 1) is carried out with lower water flow rates: in October–February they are within 72.5–151.0 km<sup>3</sup>/month, and in the remaining months – are reduced to 33.2–64.2 km<sup>3</sup>/month.

The water transfer from Region 2 to the North and East in January–May is characterized by flow rate values of 499.4–716.5 km<sup>3</sup>/month; in May–July, its intensity drops significantly (5.8–38.9); and in August–December, it increases (103.3–327.6 km<sup>3</sup>/month). The reverse water transfer to the Region 2 (in January–May) is developing quite actively (at a water flow rates of 948.8–1127.6); in June–September, its activity is weakening (130.6–324.1), and in October–December, it is increasing (457.6–741.1 km<sup>3</sup>/month).

From Region 4, the total water transfer develops in the direction of the East and South from October to May with increased flow rates (976.6–2072.4 km<sup>3</sup>/month); and in June–September – with slightly slower flow rates (294.0–646.4 km<sup>3</sup>/month). In the most part of a year, the water transfer to the Region 4 from the East and South is active, and it is characterized by water flow rate values of 595.5–1120.8 km<sup>3</sup>/month, and only in June, the water transfer is carried out at a lower speed (290.3 km<sup>3</sup>/month).

In the lower layer throughout a year, a high two-way water transport was noted across the boundaries of Regions 1, 2 and 4 of the NESS with open water areas of the Sea of Okhotsk. During a year, the transfer of waters from Region 1 to the North is developing quite actively (with water flow rates of 224.2– 629.3 km<sup>3</sup>/month), but the reverse water transfer to Region 1 is even more intensive (674.3–1014.1 km<sup>3</sup>/month) (Table 3).

During a year, the water transfer from Region 2 in the direction to the North and East is much higher and is characterized by water flow rates of 4043.4–4936.3 km<sup>3</sup>/month, the return water transfer to Region 2 passes with slightly less activity (3502.2–4390.5 km<sup>3</sup>/month).

Two-way water exchange at the border of the Region 4–E/S is also carried out with high water flow rates: in the direction from Region 4 and in the opposite stream these rates vary accordingly in the ranges 2284.6–4391.3 and 2428.3–4413.7 km<sup>3</sup>/month (Table 3).

The estimated values of vertical water exchange between the upper and lower layers are significantly different: the total range of changes in water flow rate values in Regions 1–4 are 4.1–529.3, 68.7–931.4, 20.8–260.9, 21.7–649.0 km<sup>3</sup>/month respectively. The values of vertical exchange are the least in Regions 1–4 in July, June, May, and August respectively, and they are elevated in December, March, June, and December. The highest values of vertical water exchange occur in Regions 1–4, respectively, in September–January (238.8–529.3 km<sup>3</sup>/month), December–May (553.8–931.4), June–August (110.6–260.9), and September–January (261.8–649.0 km<sup>3</sup>/month) (Table 3).

Further in the text, the results of intra-annual variations in the calculated concentrations of the main N, P, Si, substances for the second calculated year are presented and discussed. It should be noted a stable tendency of «correspondence» of the concentrations of substances (at the beginning and at the end of a year), which confirms the balance of these processes for the mean long-term conditions in the ecosystem of the NESS.

#### **Calculation of BS inputs in waters of Regions 1–4**

The input of BS into the sea water area occurs with the runoff of the Tym' River (to Region 3), from open areas of the Sea of Okhotsk (to Regions 2 and 4), as well as from neighboring water areas and with atmospheric precipitation (in Regions 1–4).

*River runoff to the sea waters of the Region 3.* Annual flow of the Tym' River is 2.591 km<sup>3</sup>/year, the average monthly flow rate is 0.216 km<sup>3</sup>/month. It is the smallest in February (0.035) and the largest in May and June (0.935 and 0.511 km<sup>3</sup>/month) (Table 3). According to the accepted average concentrations of BS as well as water flow rates, the monthly BS inputs into the surface layer of sea water in Region 3 were calculated. It

should be noted the following peculiarities of the BS inputs with river runoff into sea waters:

- the annual BS inputs with the runoff of Тым' River into the sea waters of Region 3 are: DOC – 5.97 thousand tons of C; DON – 0.12, NH<sub>4</sub> – <0.01, NO<sub>2</sub> – <0.01, NO<sub>3</sub> – 0.08, ND – 0.30 thousand tons of N; DIP and DOP – on 0.02, PD – 0.09 thousand tons of P; DISi – 2.38 thousand tons of Si;

- ~50–79.5% of the annual BS inputs with river runoff into the waters of Region 3 is in May–June; in the winter months it is the smallest (<10%); for the summer and autumn months, there are a total ~15–25% of the annual BS inputs.

*Transfer of BS at bilateral water exchange between Regions 1–4.* Table 4 shows the calculation results of the BS inputs in each region during water exchange through the boundaries between Regions 1–4, namely: the amplitude ranges of the monthly transfer, the final annual and «net» transfer (taking into account the losses to remove the BS with a counterflow of water). For Region 1, these carry-off losses are significantly lower than their input for water exchange with neighboring areas, in Region 3 – it is higher only for a number of substances (DOC, ND, PD, NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, and DIP), and in Regions 2 and 4 – the input almost all BS is less of their outputs in the neighboring areas.

*Transfer of BS in bilateral water exchange between the open waters of the Sea of Okhotsk and Regions 1–4.* Table 5 shows the results of calculations of the BS inputs in Regions 1, 2 and 4 during water exchange with open areas of the Sea of Okhotsk, in which the substance concentrations in individual months were taken as a result of previous calculations (Leonov, Sapozhnikov, 1997).

*The BS inputs with atmospheric precipitation* into the surface layer of sea water in Regions 1–4 is estimated from monthly precipitation data (Table 2) and taken as constant concentrations of BS in atmospheric moisture (DOC = 2 mg C/L, DON = 0.1, ND = 0.1; NH<sub>4</sub> = 0.3; NO<sub>2</sub> = 0.01; NO<sub>3</sub> = 0.25 mg N/L; DIP = 0.015; DOP = 0.01; PD = 0.01 mg P/L). The least amount of BS comes in the marine environment with atmospheric moisture in February: for Regions 1–2 and 3–4 these amounts in relation to the annual BS input are 3.6 and 5.0%, respectively, and the greatest amount of BS with atmospheric moisture comes in September (in Regions 1–2 and 3–4 – according to 14.1 and 11.5% of annual BS inputs respectively).

#### **Analysis of calculated dynamics of BS concentrations in waters of Regions 1–4**

The calculated intra-annual dynamics of BS concentrations and organism biomasses are shown in Fig. 2–5.

Annual changes of the concentrations of NH<sub>4</sub> (Fig. 2a) and NO<sub>2</sub> (Fig. 2b) in the aquatic environment are very similar, since these variables are closely interrelated. The initial values of the concentrations of NH<sub>4</sub> and NO<sub>2</sub> are small and vary in the waters of Regions 1–4 within 0.0002–0.001 mg N/L.

During a year, one expressed maximum of the concentrations of NH<sub>4</sub> is recorded in Regions 1–4: on the 185th, 171st, 178th, and 171st days (0.0285, 0.0198, 0.0037 and 0.0221 mg N/L), respectively. In the second half of a year, three synchronous small peaks

of  $\text{NH}_4$  concentrations can be identified in Regions 2 and 4. They are also related with clear  $\text{NO}_2$  maxima formed after the formation of intermediate  $\text{NH}_4$  peaks. In Regions 1–4,  $\text{NO}_2$  maxima fall respectively on the 188th, 173rd, 185th, and 176th days (0.0079, 0.0060, 0.0015, and 0.0068 mg N/L).

Table 4. Estimated number of BS entering the upper water layer monthly (thousand tons of Element /month) and per year (thousand t of Element/year) into waters of regions 1–4 (NESS) at the bilateral water exchange across the boundaries between these regions (1 – the range of changes by months; 2 – the annual input; 3 – the «net» input for a year, or the difference between the input and output by water flow to neighboring areas

Parameter	Region 1			Region 2		
	1	2	3	1	2	3
DOC	20.39–1258.2	7248.57	6771.21	0.00–694.53	3633.57	–3577.04
DON	0.00–171.44	644.83	238.00	7.25–180.88	1253.67	871.55
ND	1.06 –13.04	74.28	64.15	0.00 – 13.11	26.09	–54.62
PD	0.01 – 1.50	4.03	2.71	0.00 – 0.28	0.73	–3.66
DOP	0.01 – 3.53	11.41	7.85	0.01 – 4.41	17.91	7.06
$\text{NH}_4$	0.01 – 1.12	5.62	4.53	0.02 – 0.55	2.46	–3.31
$\text{NO}_2$	0.00 – 0.56	2.73	2.36	0.01 – 0.16	1.10	–1.33
$\text{NO}_3$	0.01 –26.97	74.55	67.68	0.12 – 16.68	61.85	–4.45
DIP	0.29 –11.25	47.76	34.53	0.03 – 7.98	39.81	–9.45
DISi	0.00 – 28.95	77.79	8.04	0.24 – 57.23	240.90	211.85

Parameter	Region 3			Region 4		
	1	2	3	1	2	3
DOC	0.00 – 514.49	1843.15	699.98	0.00 –268.58	1252.04	–3740.39
DON	0.00 – 124.55	349.84	–1073.67	0.19 –253.30	1158.43	–37.35
ND	0.02 – 8.13	40.24	38.19	0.00 – 3.83	8.39	–47.82
PD	0.00 – 0.75	2.23	1.42	0.00 – 0.63	1.15	–0.47
DOP	0.01 – 1.96	4.42	–11.02	0.00 – 1.98	17.91	–8.38
$\text{NH}_4$	0.00 – 0.48	1.75	1.20	0.00 – 0.30	1.34	–1.80
$\text{NO}_2$	0.00 –1.46	1.68	1.12	0.00 – 0.11	1.10	–0.64
$\text{NO}_3$	0.00 – 2.12	5.24	–58.77	0.00 – 16.07	55.20	–7.01
DIP	0.00 – 10.61	40.26	32.36	0.00 – 2.79	9.16	–53.92
DISi	0.00 – 24.98	61.69	–247.51	0.00 – 57.23	202.83	–46.64

The initial values of  $\text{NO}_3$  concentrations in Regions 1–4 differ and amount to 0.030, 0.028, 0.036, and 0.020 mg N/L, respectively. In general, the same trends are observed in the dynamic of  $\text{NO}_3$  concentrations in the waters of all regions. In the first half of a year,  $\text{NO}_3$  is accumulated in water environment, and in Regions 1 and 2, the rates of  $\text{NO}_3$  accumulation are higher, and  $\text{NO}_3$  peaks (0.0640 and 0.0551 mg N/L) are noted here respectively on 168th and 120th days. In Regions 3 and 4, the highest concentrations of  $\text{NO}_3$  were recorded respectively at 152nd and 185th days (0.0422 and 0.463 mg N/L). During the period 183–218th days, concentrations of  $\text{NO}_3$  are sharply decreased (up to

0.7–2.8 µg N/L) in waters of all regions. These small concentrations of NO<sub>3</sub> persist till 292nd day in the waters of Regions 1–4. The content of NO<sub>3</sub> concentrations in the aquatic environment are restored to their original values in the period autumn – the end of a year (Fig. 2c).

Table 5. Estimated amount of BS entering the upper water layer monthly (thousand tons of Element/month) and for a year (thousand t of Element/year) into waters of Regions 1, 2 and 4 (NESS) at the bilateral water exchange through boundaries with the open waters of the Sea of Okhotsk (1 – range of changes by months, 2 – annual input, 3 – «net» annual input, or difference between input and output by water flow to open water areas of the sea) (dash – flux was not estimated)

Parameter	Region 1			Region 2			Region 4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DOC	1.67 – 30.95	139.79	-4335.26	398.85 – 3534.06	25151.06	15487.09	85.24 – 1957.54	11539.78	8107.60
DON	0.04 – 3.27	10.24	-2106.08	0.09 – 6.32	29.71	-1731.35	14.22 – 304.08	1445.96	460.36
ND	0.01 – 2.94	3.83	-37.75	0.10 – 5.27	16.91	10.54	0.11 – 5.04	19.65	-6.67
PD	0.01 – 0.07	0.33	-3.22	0.03 – 2.03	7.80	1.43	0.11 – 1.13	6.02	3.94
DOP	0.01 – 0.17	0.73	-38.74	0.01 – 5.99	13.91	-31.66	0.06 – 7.64	35.35	29.40
NH <sub>4</sub>	0.01 – 0.09	0.49	-5.38	0.04 – 0.60	4.38	-1.61	0.10 – 0.94	4.66	3.25
NO <sub>2</sub>	0.01 – 0.04	0.21	1.73	0.03 – 0.23	1.77	-1.45	0.03 – 0.59	3.60	3.23
NO <sub>3</sub>	0.04 – 3.38	13.39	-102.98	2.65 – 45.03	246.18	104.47	0.92 – 20.98	111.84	92.27
DIP	0.00 – 0.26	1.14	-66.37	0.01 – 2.71	12.96	-81.24	0.17 – 16.43	77.90	37.05
DISi	0.06 – 0.87	4.80	-224.32	0.35 – 15.86	99.46	-62.63	2.80 – 125.75	720.41	617.62

In the first part of a year, the dynamics of the total mineral N (N<sub>min</sub>) concentrations in the waters of Regions 1–4 oscillates synchronously with changes in the NO<sub>3</sub> concentrations as the dominant fraction of N<sub>min</sub>. In the middle of a year, expressed maxima of N<sub>min</sub> contents were noted: in Regions 1 and 3 – on the 185th day (0.0971 and 0.0469 mg N/L) and in Regions 2 and 4 – on the 174th day (0.0747 and 0.0668 mg N/L), which is a consequence of the increased concentrations of NH<sub>4</sub> and NO<sub>2</sub>, fixed in these regions in almost the same periods of time. In the last third of a year, the dynamics of N<sub>min</sub> concentrations coincides practically with the NO<sub>3</sub> dynamics since the content of NH<sub>4</sub> and NO<sub>2</sub> remains low in the second half of a year and does not significantly affect the total N<sub>min</sub> content in different regions of the sea (Fig. 2d)

In the waters of coastal Regions (1 and 3) and in remoted from the coast Regions (2 and 4), concentrations of DON differ significantly. In the waters of Regions 1 and 3, the concentration of DON is higher for most part of a year. Annual amplitude of DON fluctuations in these regions are smaller (respectively, within 0.6423–0.3942 and 0.6400–0.4871 mg N/L) in comparison with Regions 2 and 4. The initial DON concentrations in the waters of Regions 2 and 4 are 0.5 and 0.23 mg N/L respectively. In Region 2 during the first half of a year, the DON content decreases to 0.2092 mg N/L, and in Region 4, it practically does not change. In summer period, the DON content in the waters of Regions 2 and 4 increases significantly: in the Region 2 – to 0.5738 mg N/L (at 274th day), and in the Region 4 – to 0.7538 mg N/L (at 245th day). By the end of a year,

the content of DON in the waters of Regions 2 and 4 is decreasing and approaching the initial values (Fig. 2e).

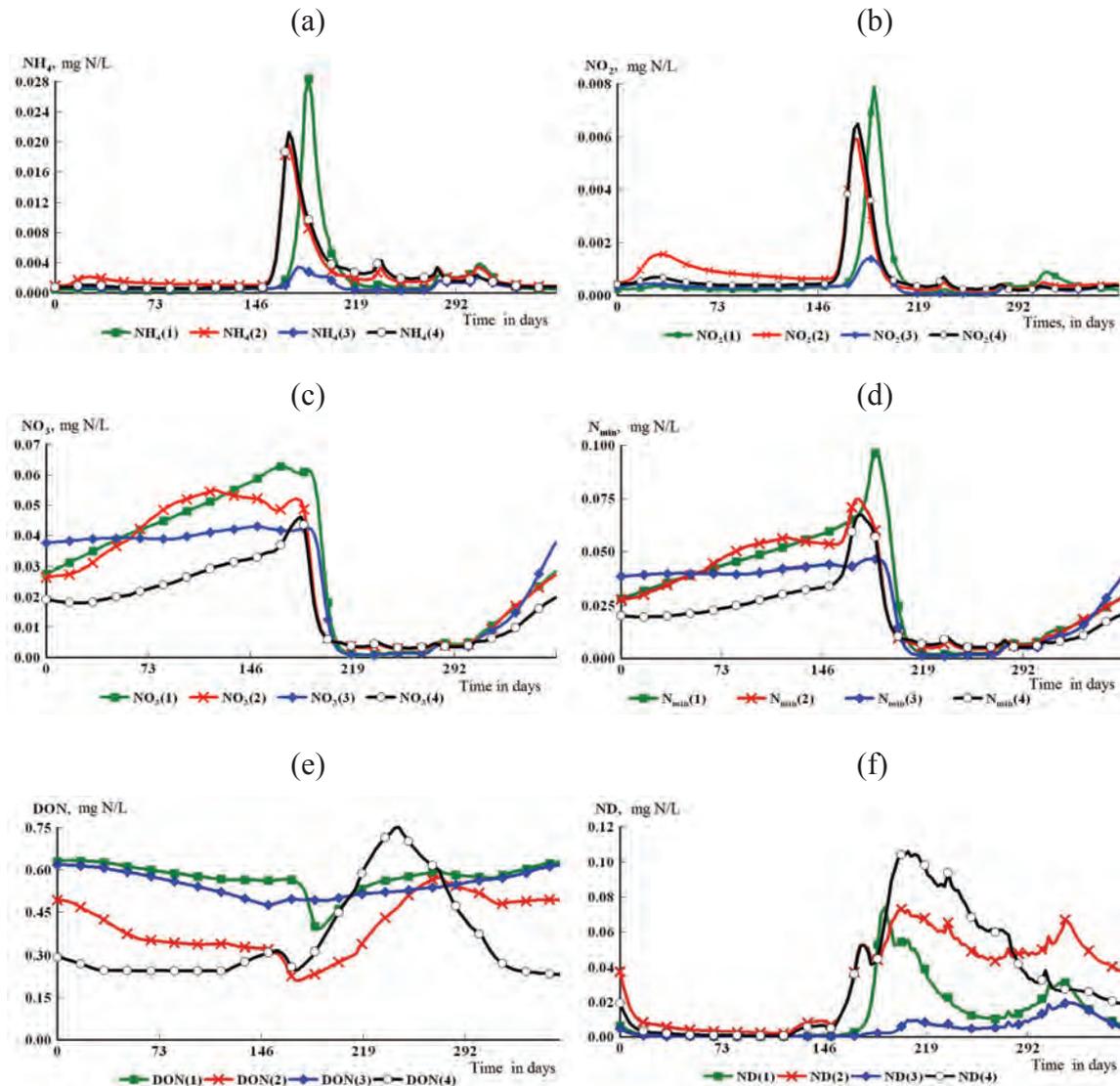


Fig. 2. Dynamics of the N form concentrations for the second calculated year:  $\text{NH}_4$  (a),  $\text{NO}_2$  (b),  $\text{NO}_3$  (c),  $N_{\min}$  (d), DON (e), ND (f) in the waters of Regions 1–4 (NESS)

In coastal waters (Regions 1 and 3), the initial concentrations of ND are lower (0.007 and 0.005 mg N/L) than in Regions 2 and 4 (0.038 and 0.02 mg N/L). In Regions 1–4, the general trend in the decreasing of ND concentrations persists in January–February, and the ND content in Regions 1 and 3 decreases to 0.1–0.2  $\mu\text{g N/L}$ , and in Regions 2 and 4 – to 0.9–3.2  $\mu\text{g N/L}$  on 60th day. By the beginning of the second half of a year and further till the end of autumn, two maximal concentrations of ND are formed: in Region 1 – on the 190th and 320th days (0.0745 and 0.0312 mg N/L), in Region 2 – on the 207th and 320th days (0.0721 and 0.0666), in the Region 4 – on the 176th and 207th days (0.0530 and 0.1060 mg N/L). In Region 3, the highest concentrations of ND were significantly lower, and they were noted on the 221st and 322nd days (0.0073 and 0.0193 mg N/L respectively) (Fig. 2f).

In the first half of a year in the waters of Regions 1 and 2, the change in DIP concentrations differs little from each other, showing fluctuations in ranges of 0.0191–0.0220 and 0.0172–0.0236 mg P/L respectively. In the waters of Regions 3 and 4, the DIP concentrations varied between 0.0050–0.0154 and 0.0086–0.0154 mg P/L respectively. In the second part of a year, the pattern of changes in DIP concentrations in the waters of each region is very specific. In the Region 1, to 209 days, the DIP content is reduced on the 209th day to a minimum (0.0070 mg P/L), then the highest concentration of DIP (0.0227 mg P/L) is reached by 312nd day, and by the end of a year, it gradually decreases to 0.0190 mg P/L. In Region 2, an intermediate minimum of the DIP content (0.0135 mg P/L) was noted at the 192nd day, and after which the DIP concentration increased to its maximum by 269th day (0.0407 mg P/L), then decreased to 346th day (up to 0.0150 mg P/L) and by the end of the year it increases to 0.0206 mg P/L. In Region 3, the DIP content reaches its maximum at the 188th day (0.0160 mg P/L), after which its gradual decrease begins and by the end of a year its concentration drops to 0.0019 mg P/L. In Region 4, the maximum DIP concentration (0.0463 mg P/L) was observed on the 245th day, then the DIP content was reduced to 0.0045 mg P/L (344th day), and by the end of a year, it increased to 0.0113 mg P/L (Fig. 3 a).

In almost first half of a year, the DOP concentrations in the waters of Regions 1, 3 and 4 are without significant changes and retains its highest values (0.0167, 0.0079 and 0.0077 mg P/L respectively). A sharp decrease in DOP concentrations in the waters of Regions 3 and 4 occurs from the 160th and by the 175th days (they drop to <1 µg P/L), while in Region 1, the decrease of the DOP concentration occurs from 175th to 190th days (down to <1 µg P/L). In Region 2, the decrease in DOP concentration occurs from 7 to 171st days: during this period, the DOP concentration decreases from 22.1 to <1 µg P/L. In all regions, low DOP concentrations persist up to ~ 300 days. Over the past two months before the end of a year, in the waters of Regions 1–4, the DOP concentrations have increased (correspondingly to 0.0151, 0.0205, 0.0056, and 0.0054 mg P/L), and these values are close to those taken at the beginning of a year (Fig. 3 b).

Since the beginning of a year, the PD content has been sharply reduced, and already at 5 day, low concentrations (in the order of 0.2–0.8 µg P/L) are established in the water of Regions 1–4. They are retained in the waters of all regions during the first half of a year, then in the waters of Regions 1, 2 and 4 they increase to 1.5 µg P/L, and in Region 3, they remain low for a few months (<1 µg P/L). However, during a year, synchronous short-term maxima of PD contents are recorded in Regions 1–4 in the background of low concentrations of PD: by 236th day (1.5, 3.1, 0.6, and 3.67 µg P/L), by 279th day (2.25, 3.37, 1.76, and 2.59 µg P/L), by the 308th day (3.85, 3.34, 3.03, and 2.03 µg P/L). In the past two months, individual PD maxima in the waters of Regions 1–3 have been formed at different times: respectively, on the 322nd day (4.58 µg P/L), on the 324th day (7.10) and on the 332nd day (2.57 µg P/L). By the end of a year, the concentrations of PD in the waters of Regions 1–3 decrease accordingly to 2.30, 6.17, and 1.06 µg P/L, and in Region 4 they increase to 2.66 µg P/L (Fig. 3 c).

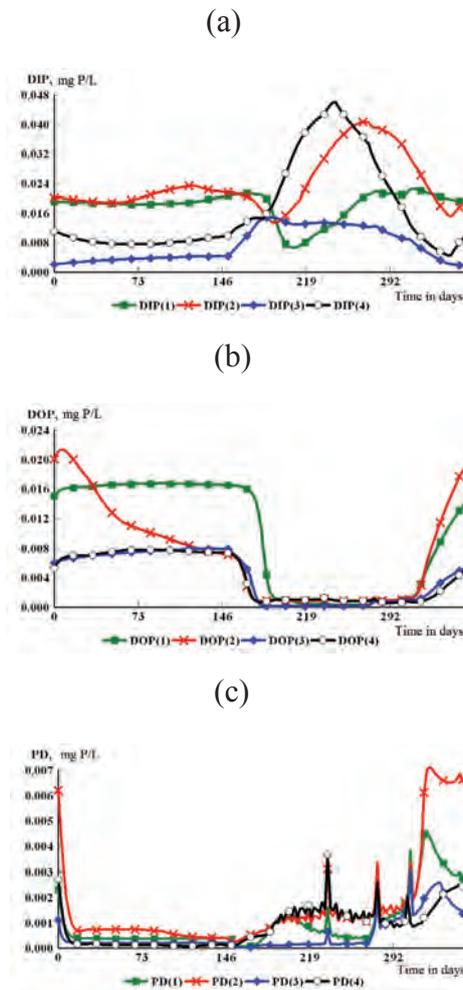


Fig. 3. Dynamics of the concentration of P forms for the second calculated year: DIP (a), DOP (b), PD (c) in the waters of Regions 1–4 (NESS)

The intra-annual changes of the content of N and P in dissolved ( $N_{dis}$ ,  $P_{dis}$ ) and suspended ( $N_{par}$ ,  $P_{par}$ ) fractions, and also the total content of N and P ( $N_{tot}$ ,  $P_{tot}$ ) in Regions 1–4 are shown in Fig 4. Let us estimate the ranges of variability and ratios of these components in different regions of the NESS. The limits of the fluctuations in the waters of the Regions of 1–4 concentrations of  $N_{dis}$  are 0.4884–0.6706, 0.2737–0.5789, 0.5146–0.6770, and 0.2497–0.7568 mg N/L (Fig. 4 a), respectively; the concentrations of  $N_{par}$  – are 0.3–159.5, 2.4–171.7, 0.1–56.6, and 0.5–216.3  $\mu\text{g}$  N/L (Fig. 4 c), and the concentrations of  $N_{tot}$  – are 0.620–0.679, 0.392–0.692, 0.530–0.682, and 0.243–0.932 mg N/L (Fig. 4 e). In the waters of regions 1–4, the changes of  $P_{dis}$  concentrations are 7.7–35.9, 14.4–42.2, 6.5–16.3, and 7.5–47.2  $\mu\text{g}$  P/L (Fig. 4 b), concentrations  $P_{par}$  – 0.4–21.1, 0.6–26.6, 0.1–18.9, and 0.6–23.0  $\mu\text{g}$  P/L (Fig. 4 d), the concentrations of  $P_{tot}$  are 23.3–44.2, 29.5–62.6, 11.2–28.6, and 16.5–70.0  $\mu\text{g}$  P/L (Fig. 4 f).

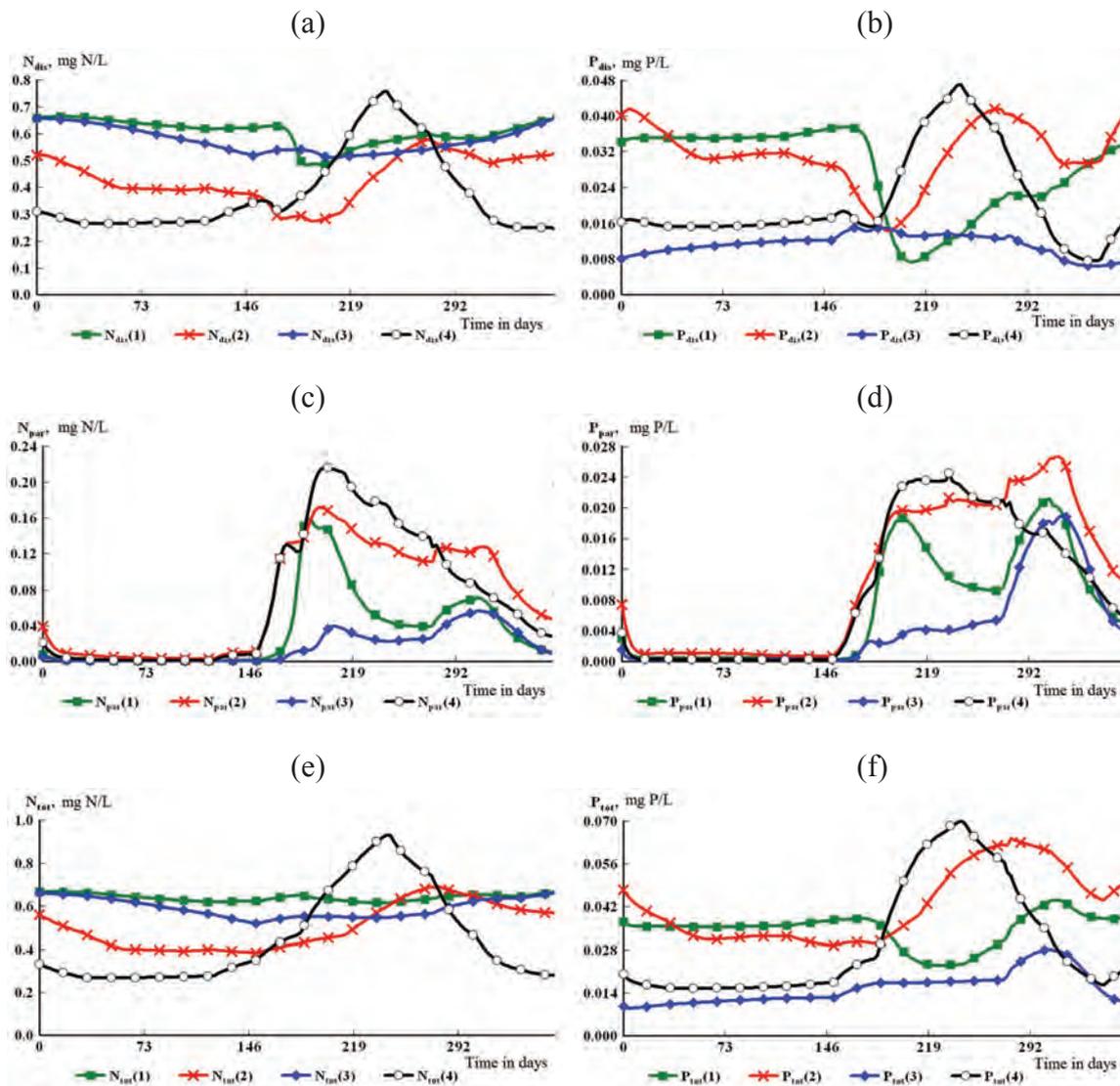


Fig. 4. Dynamics of aggregated concentrations of N (a, c, e) and P (b, d, f) for the second calculated year:  $N_{dis}$  (a),  $P_{dis}$  (b),  $N_{par}$  (c),  $P_{par}$  (d),  $N_{tot}$  (e),  $P_{tot}$  (f) in waters of Regions 1–4 (NESS)

The ratios of  $N_{dis} : P_{dis}$  concentrations in the waters of Regions 1–4 are, respectively (18.7–63.4) : 1, (13.7–19.0) : 1, (41.5–79.2) : 1, and (16–33.3) : 1;  $N_{par} : P_{par}$  – (0.8–7.6) : 1, (4–6.5) : 1, (1–3) : 1, and (0.8–9.4) : 1;  $N_{tot} : P_{tot}$  – (15.4–26.6) : 1, (11.1–13.3) : 1, (23.8–47.3) : 1, and (13.3–14.7) : 1. Thus, a comparison of the values of the ratios of the components N and P shows that:

- in waters of all regions, the range of changes in the proportions of the suspended components  $N_{par} : P_{par}$  is generally lower than the ratio of the concentrations of their dissolved and total components;
- waters of Region 3, into which the river runoff arrives, have smaller ranges of variability in the ratios of the suspended fractions  $N_{par} : P_{par}$  at higher ranges of ratios of their dissolved and total concentrations;
- there are differences in the ratios of the components N : P depending on the

location of the regions: in coastal Regions 1 and 3, on the whole, the ranges of variability of the ratios of dissolved and total N : P concentrations are higher than in Regions 2 and 4 remote from the coast.

#### **Analysis of calculated dynamics of organism biomasses in waters of Regions 1–4**

During a year, the changes of BS concentrations in the waters of Regions 1–4 depend on the development of organisms of the lower trophic links – the heterotrophic bacteria  $B1$ , different groups of phytoplankton ( $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$ ) and zooplanktons ( $Z1$ ,  $Z2$ ). The features of the development of organisms in different regions of the NESS can be traced from the calculated values of their biomass, specific growth rates ( $k_{0i}$ ) and bioproduction ( $BP_i$ ). According to the values of biomass, the periods of active development of organisms, associated with the production of organic matter (OM) and BS, are distinguished during a year, the values of the biomass and specific growth rates  $k_{0i}$  can characterize the environmental conditions for the biomass development. In different regions, the influence of individual factors and the supply of biomass by nutrition substrates may be substantially different. The  $BP_i$  values of each biomass group are calculated on the basis of estimated internal substance fluxes that determine the conditions for the biomass development during their consumption of BS, the release of metabolic products and dead. The maximum values of  $k_{0i}$  are fixed one or two weeks before the formation of the highest biomass values of considered group of organisms. For areas of the Sakhalin Shelf, an active dynamics of water masses is characterized, and together with internal substance fluxes, these factors significantly affect on the final indicators of the state and development of organisms of the lower trophic links (Pishchal'nik et al., 2014).

In this serie of calculations, the values of the organism biomass are shown in Fig. 5 in the N units – for heterotrophic bacteria ( $B1N$ ), three groups of phytoplankton ( $F1N$ ,  $F2N$ ,  $F3N$ ) and two groups of zooplankton (herbivorous  $Z1N$  and predatory  $Z2N$ ). Until mid-May, the biomass of these organisms in the water Region 1–4 of the NESS remains low, the main changes in the biomass values occur from mid-May to the end of a year. In the waters of Region 3, the values of biomass are significantly lower in comparison with other regions. It should be noted that there are fundamental differences in changes of the biomass values in the second half of a year in the waters of coastal Regions 1 and 3 and in Regions 2 and 4 remote from the coast. In dynamics of  $B1N$ ,  $F1N$  and  $Z1N$  biomasses, two biomass peaks (spring and autumn) are formed, in the coastal Regions 1 and 3, the minimum values between these two maxima are more expressed. Otherwise, the biomasses of  $F2N$ ,  $F3N$  and  $Z2N$  are developing: they have distinct differences in the values of biomass in Regions 1–4: in Regions 1 and 3, the biomasses are lowered, and in Regions 2 and 4, they are increased. It should be noted that the biomass values of  $F1N$  and  $F2N$  are comparable, and in comparison with them, the  $F3N$  biomass values are significantly lower.

Positive values of production ( $BP_i$ ) characterize the conditions of growth of organism biomasses (they occur in the second half of a year). The values of the biomass production are calculated for each region on the basis of the sum of the substance fluxes forming the

biomass of a particular group of organisms at each time step. It is calculated in two dimensions:

1. Per unit of water volume in the layer under consideration for each month (g of Element/(m<sup>3</sup>×month)).

2. For the whole water volume of the this layer (thousand tons of Element/month). Ranges of production biomass values are shown in Table 6 as their total values for production period.

It should be noted that each group of organisms has characteristic production values and duration of the period with their positive values (Fig. 5; Table 6). Let us estimate the changes of parameters characterizing the development of organism biomasses.

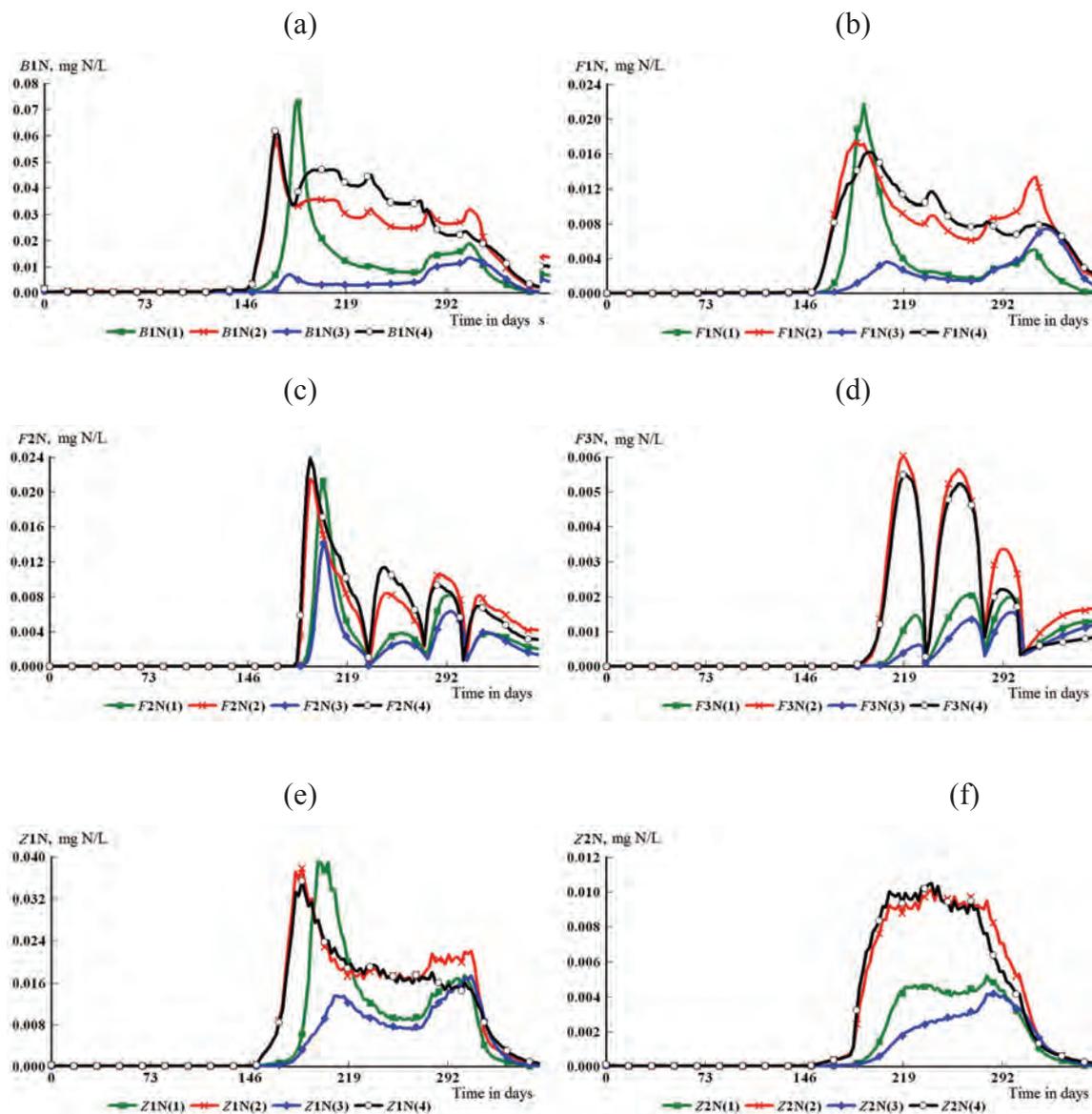


Fig. 5. Dynamics of organism biomasses for the second calculated year: heterotrophic bacteria B1N (a), three phytoplankton groups – F1N (b), F2N (c), and F3N (d), zooplankton: herbivorous, Z1N (e) and predatory, Z2N (f) in waters of Regions 1–4 (NESS)

**Biomass of heterotrophic bacteria  $B_{1N}$ .** From the middle of May, there are the differences in development of  $B_{1N}$  biomass in the coastal Regions 1 and 3, as well as in Regions 2 and 4 located further from the coast (Fig. 5 a). In the coastal waters of Region 1, two maxima of the  $B_{1N}$  biomass are created in the second half of a year: the first – in spring (0.0729 mg N/L on the 185th day) and the second – in autumn (0.0189 mg N/L on the 310th day). The highest values of the specific growth rate of  $B_{1N}$  biomass ( $k_{OB1}$ ) in spring fall on the 178th day (0.186 day<sup>-1</sup>), and in the autumn – by 308th day (0.092 day<sup>-1</sup>). In the waters of Region 3 in the second half of a year, the  $B_{1N}$  biomass is kept low in comparison with other regions of the NESS: the first small spring maximum here is formed on the 178th day (0.0070 mg N/l) and the second autumn – by 308 day (0.0130 mg N/l). In this region, the highest values of  $k_{OB1}$  for the formation of the spring and autumn maximums were on 171st and 278th days (0.297 and 0.178 day<sup>-1</sup> respectively). By the end of a year, the  $B_{1N}$  biomass in the waters of Regions 1 and 3 decreases to 0.0003 and 0.0002 mg N/l, respectively.

In Regions 2 and 4, one spring maximum of  $B_{1N}$  biomass is formed (on the 168th day – 0.0585 and 0.0618 mg N/L respectively) at the highest values of  $k_{OB1}$  for the 164th day (0.056 and 0.050 day<sup>-1</sup>, respectively). In the following period (during summer – autumn), sufficiently high values of  $B_{1N}$  biomass are maintained in waters of Regions 2 and 4 with a tendency to gradually decrease by the end of a year (respectively to 0.0013 and 0.0011 mg N/L).

The production period for  $B_{1N}$  bacteria continues in the waters of Regions 1, 2, and 4 from June to November, and in the Region 3 – from June to December (Table 6).

In some months in Regions 1–4, the ranges of  $BP_{B_{1N}}$  values, expressed per water volume unit of upper layer, are approximately of the same order (only Region 3 is remarkable for their lower values of  $BP_{B_{1N}}$ ). The total values of production of  $B_{1N}$  biomass,  $BP_{B_{1N}}$ , for the production period is higher in the water of Regions 2 and 4 (1.8848 and 2.4893 g N/(m<sup>3</sup>×month)), which are far from the coast, in comparison with the coastal Regions 1 and 3 (1.1061 and 0.3124 g N/(m<sup>3</sup>×month)). In principle, the same tendencies are preserved even when expressing the values of  $BP_{B_{1N}}$  for the volume of the entire water layer. However, in this case, the value of  $BP_{B_{1N}}$  in region of 1 (2002.7 thousand tons N) is higher than in the Regions 2–4 (1.149.3, 583.5, and 1613.9 thousand tons N, respectively). When the  $BP_{B_{1N}}$  is expressed per unit volume of the upper layer water, its maximum values in the waters of Regions 1–4 fall on July, June, October, June (0.5113, 0.4614, 0.0998, 0.8824 g N/(m<sup>3</sup>×month), respectively). In the waters of Regions 1–4, taking into account the entire volumes of water, the largest values of  $BP_{B_{1N}}$  are registered in July, October, November, and August (correspondingly 735.8, 266.6, 238.7, and 338.1 thousand tons N/month). These calculated values of  $BP_{B_{1N}}$  depend directly on the water volumes of the upper layer and indirectly from the concentrations of BS in the layer, affecting the final values of the production of  $BP_{B_{1N}}$  biomass (Table 6).

Table 6. The calculated values of the production (BPi) for organisms in different months and for the whole productive period in Regions 1–4 of NESS (uwl – upper water layer; \*for period of positive values of BPi; dash – BPi values are negative)

Volume, Biota	Dimension	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ*
Region 1									
V, uwl	km <sup>3</sup>	959.4	1439.1	1918.8	2398.4	2878.1	3597.7	4796.9	–
B1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.2072 198.78	0.5113 735.81	0.0896 171.92	0.0575 137.91	0.1481 426.25	0.0923 332.07	–	1.106 2002.74
F1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.0405 38.86	0.2242 322.65	0.0237 45.48	0.0048 11.51	0.0231 66.48	0.0224 80.59	–	0.3387 565.57
F2N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.1540 221.62	0.0362 69.46	0.0288 69.07	0.0776 223.41	0.0297 106.85	0.0167 80.11	0.3430 770.52
F3N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.0007 1.01	0.0084 16.12	0.0183 43.89	0.0141 40.58	0.0045 16.19	0.0054 25.90	0.0460 143.69
Z1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.0010 0.96	0.3985 573.48	0.1644 315.45	0.0728 174.60	0.1525 438.91	0.0531 191.04	–	0.8423 1694.44
Z2N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.0054 7.77	0.0260 49.89	0.0265 63.56	0.0267 76.84	0.0051 18.35	–	0.0897 216.41
Region 2									
V, uwl	km <sup>3</sup>	300.0	450.0	600.0	750.0	900.0	1125.0	1500.0	–
B1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.4614 138.42	0.3868 174.06	0.3298 197.88	0.2388 179.10	0.2964 266.76	0.1717 193.16	–	1.8849 1149.38
F1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.1163 34.89	0.1553 69.89	0.0508 30.48	0.0350 26.25	0.0575 51.75	0.0518 58.28	–	0.4667 271.54
F2N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.2076 93.42	0.0707 42.42	0.0662 49.65	0.1193 107.37	0.0456 51.30	0.0234 35.10	0.5328 379.26
F3N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.0193 8.69	0.0553 33.18	0.0488 36.60	0.0307 27.63	0.0043 4.84	0.0051 7.65	0.1635 118.59
Z1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.1579 47.37	0.4288 192.96	0.1994 119.64	0.1704 127.80	0.2387 214.83	0.0845 95.06	–	1.2797 797.66
Z2N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.0003 0.09	0.0435 19.58	0.0881 52.86	0.0814 61.05	0.0614 55.26	0.0108 12.15	–	0.2855 200.99
Region 3									
V, uwl	km <sup>3</sup>	700.0	1050.0	1400.0	1750.0	2100.0	2625.0	3500.0	–
B1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.0451 31.57	0.0326 34.23	0.0215 30.10	0.0225 39.38	0.0998 209.58	0.0909 238.61	–	0.3124 583.47
F1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.0037 0.03	0.0388 40.74	0.0109 15.26	0.0102 17.85	0.0309 64.89	0.0472 123.90	0.0108 37.80	0.1525 300.47
F2N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.0892 93.66	0.0194 27.16	0.0206 36.05	0.0532 111.72	0.0352 92.40	0.0155 54.25	0.2331 415.24
F3N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.0003 0.32	0.0039 5.46	0.0065 11.38	0.0095 19.95	0.0040 10.50	0.0051 17.85	0.0293 65.46
Z1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.0015 1.05	0.1040 109.20	0.0995 139.30	0.0539 94.33	0.1237 259.77	0.0832 218.40	0.0003 1.05	0.4661 823.10
Z2N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.0031 3.26	0.0146 20.44	0.0155 27.12	0.0218 45.78	0.0078 20.48	0.0006 2.10	0.0634 119.19
Region 4									
V, uwl	km <sup>3</sup>	375.3	563.0	750.7	938.4	1126.0	1407.5	1876.7	–
B1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.8824 331.16	0.5721 322.09	0.4504 338.12	0.3081 289.12	0.1970 221.82	0.0793 111.62	–	2.4893 1613.93
F1N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	0.2718 102.01	0.2906 163.61	0.0990 74.32	0.0584 54.80	0.0501 56.41	0.0355 49.97	0.0010 1.88	0.8064 503.00
F2N	g N/(m <sup>3</sup> mon.) thous. t N/mon.	–	0.2560 144.13	0.0928 69.67	0.0781 73.29	0.0677 76.23	0.0311 43.77	0.0129 24.21	0.5386 431.30

F3N	$\frac{\text{g N}/(\text{m}^3 \text{ mon.})}{\text{thous. t N/mon.}}$	–	$\frac{0.0143}{8.05}$	$\frac{0.0497}{37.31}$	$\frac{0.0482}{45.23}$	$\frac{0.0222}{25.00}$	$\frac{0.0026}{3.66}$	$\frac{0.0035}{6.57}$	$\frac{0.1405}{125.82}$
Z1N	$\frac{\text{g N}/(\text{m}^3 \text{ mon.})}{\text{thous. t N/mon.}}$	$\frac{0.2653}{99.57}$	$\frac{0.6595}{371.30}$	$\frac{0.2555}{191.80}$	$\frac{0.1889}{177.27}$	$\frac{0.1691}{190.41}$	$\frac{0.0632}{88.95}$	–	$\frac{1.6015}{1119.30}$
Z2N	$\frac{\text{g N}/(\text{m}^3 \text{ mon.})}{\text{thous. t N/mon.}}$	$\frac{0.0008}{0.30}$	$\frac{0.0499}{28.09}$	$\frac{0.0867}{65.09}$	$\frac{0.0778}{73.01}$	$\frac{0.0459}{51.68}$	$\frac{0.0076}{10.70}$	–	$\frac{0.2687}{228.87}$

**The biomass of the first phytoplankton group,  $F1N$** , develops with the formation of two maxima (in spring, and in autumn). However, in some cases, the severity of seasonal  $F1N$  maximums in regions are different. For example, in Region 3, the spring  $F1N$  maximum is smoothed out, and in the Region 4, their autumnal maximum is smoothed (Fig. 5 b). In Regions 1–4, of the spring maximum of the  $F1N$  biomass fall respectively on the 190th, 185th, 207th, and 195th days (0.0219, 0.0173, 0.0036, and 0.0163 mg N/L). In Regions 1–4, the largest values of  $k_{0F1}$  forming spring  $F1N$  peaks are respectively, 0.385, 0.127, 0.166, and 0.125 day<sup>-1</sup> (and these are found on 183rd, 178th, 195th, and 183rd days).

The pronounced minima of the  $F1N$  biomass between the spring and autumn peaks in the waters of Regions 1–3 are registered for the 269–272nd days (0.0016, 0.0061, and 0.0014 mg N/L, respectively), and in waters of Region 4 – in the above-mentioned period of the  $F1N$  minimum is formed later – on the 300th day (0.0067 mg N/L).

The autumn  $F1N$  maximum was observed in Regions 1–2 at 317th day (0.0050 and 0.0133 mg N/L), and in Regions 3–4 – at 323nd day (0.0074 and 0.0079 mg N/L). The highest  $k_{0F1}$  values in the Regions 1–4 forming the autumn  $F1N$  peaks fall on the 310th day (0.319, 0.100, 0.156, and 0.091 day<sup>-1</sup>, respectively). By the end of a year, the  $F1N$  values decrease to 0.0001–0.0005 and 0.0013–0.0012 mg N/L respectively in the coastal Regions 1 and 3 and in Regions 2 and 4 located further from the coast.

In Regions 1–2 and 3–4, the formation of  $F1N$  production,  $BP_{F1N}$ , occurs respectively in periods of June–November and June–December. The ranges of  $BP_{F1N}$  changes for the production period in Regions 1–2 are 0.0048–0.2242 and 0.0350–0.1553 g N/(m<sup>3</sup>×month) (at the total values of 0.3387 and 0.4667 grams N/m<sup>3</sup>), and in Regions 3 and 4 – (0.0037–0.0472 and 0.0010–0.2906 g N/(m<sup>3</sup>×month) (at the total of 0.1525 and 0.8064 g N/m<sup>3</sup>)). The  $BP_{F1N}$  values based on the water volume of the upper layer in the coastal part of the sea are higher in Region 1 (11.5–322.7 thousand tons N/month (the total amount is 565.6 thousand tons N) than in the Region 3 (0.03–123.9, 303.5), and in regions remote from the coast, it is higher in Region 4 (1.9–163.6, 503.0) than in Region 2 (26.3–69.9, 271.5 thousand tons N/month). In Regions 1, 2 and 4, the  $BP_{F1N}$  highest values on the unit water volume of the upper layer were recorded in July (0.2242, 0.1553, and 0.2906 g N/(m<sup>3</sup>×month), and in Region 3 – in November (0.0472 grams N/(m<sup>3</sup>×month)).

In calculations of the  $BP_{F1N}$  values for the volume of the whole layer, in Regions 1, 2 and 4 in July, the largest values are 322.7, 69.9, and 163.6 thousand tons N/(m<sup>3</sup>×month), and in Region 3 – in November (123.8 thousand tons N/(m<sup>3</sup>×month)). The total  $BP_{F1N}$  values for the production period in the waters of Regions 1–4 are 565.6, 271.5, 300.5, and 503.0 thousand tons of N (Table 6).

**The phytoplankton biomasses of the second and third groups,  $F2N$  and  $F3N$ ,** in the second half of a year, develop similarly to each region with rather rapid alternations of intermediate biomass maxima and minima (Fig. 5 c, d). Generally, the formation of  $F2N$  maxima occurs earlier than the maximum of  $F3N$ . A sharp change in the extremes of the  $F2N$  and  $F3N$  biomasses is caused by the conditions of water exchange between the regions in the period 182–365th days. The maximums are formed simultaneously – first in the Regions 2 and 4 located further from the coast, and then in the coastal Regions 1 and 3.

The first  $F2N$  maximum in Regions 2 and 4 is formed on the 192th day (0.0214 and 0.0237 mg N/L) with the largest values of  $k_{0F2}$  0.498–0.564 and 0.533–0.540 day<sup>-1</sup> fixed in these regions on the 178–183th days. In the waters of Regions 1 and 3, the first maximum of  $F2N$  biomass falls on the 202nd day (0.0213 and 0.0139 mg N/L at the highest values of  $k_{0F2}$  0.427–0.436 and 0.516–0.527 day<sup>-1</sup> on the 190–192th days). Then, at the 236th day, simultaneous formation of the first intermediate minimum  $F2N$  (0.0001–0.0010 mg N/L) in Regions 1–4 was noted (Fig. 5 c).

The second maximum of  $F2N$  (0.0084 and 0.0113 mg N/L) in Regions 2 and 4 was marked on the 248th day at the corresponding maximum values of  $k_{0F2}$  0.300 and 0.230 day<sup>-1</sup> (at the 238th day). In the waters of Regions 1 and 3, the second maximum of  $F2N$  falls on the 260th day (0.0038 and 0.0028 mg N/L), and the largest values of  $k_{0F2}$  in these regions (0.389 and 0.330 day<sup>-1</sup>) were also noted on the 238th day. The second  $F2N$  minimum (0.0008–0.0024 mg N/L) is formed on the 277th day simultaneously in Regions 1–4 (Fig. 5 c).

The third maximum of  $F2N$  in Regions 2 and 4 (0.0104 and 0.0093 mg N/L) falls on the 288th day and the largest values of  $k_{0F2}$  (0.278 and 0.230 day<sup>-1</sup>) – on the 276th day. In Regions 1 and 3, the values of the third  $F2N$  maximum (0.0082 and 0.0063 mg N/L) were recorded on the 296th day, and the largest values of  $k_{0F2}$  (0.377 and 0.416 day<sup>-1</sup>) – on the 278th day. The third minimum of  $F2N$  (0.7–1.2 µg N/L) was recorded on the 306th day (Fig. 5 c).

In Regions 2 and 4, the fourth  $F2N$  maximum of (0.0082 and 0.0069 mg N/L) occurs on the 317th day, and they are formed at the highest values of  $k_{0F2}$  (0.383 and 0.430 day<sup>-1</sup>) by the 305–308th days. In the waters of Regions 1 and 3, the fourth  $F2N$  maximum (0.0038 and 0.0039 mg N/L) are fixed for the 324th day, and the largest values of  $k_{0F2}$  (0.322 and 0.383 day<sup>-1</sup>) – on the 308th day. By the end of a year, the  $F2N$  biomass values in Regions 1–4 decrease to 0.0019, 0.0040, 0.0013, 0.0029 mg N/L respectively (Fig. 5 c).

In the waters of Regions 1–2 and 3–4, the production values of  $F2N$ ,  $BP_{F2N}$ , are formed respectively in July–December and June–December. The fluctuation limits of the  $BP_{F2N}$  values for the production period in the Regions 1–2 are 0.0167–0.1540 and 0.0234–0.2076 g N/(m<sup>3</sup>×month) respectively (at the total values – 0.3430 and 0.5328 g N/m<sup>3</sup>), and in regions 3 and 4 – (0.0155–0.0892 and 0.0311–0.2560 g N/(m<sup>3</sup>×month) at total values - 0.2331 and 0.5398 grams N/m<sup>3</sup>). The values of  $BP_{F2N}$  in terms of the volume of the upper layer water in the coastal part of the sea are higher in the Region 1 (69.1–223.4 thousand tons N/month with the total value of 770.5 thousand tons N) than in the Region 3 (27.2–111.7, 415.2 thousand tons N), and in Regions 2 and 4, these values

are higher: in the Region 4 – 24.2–144.1 thousand tons N/month (with the total value of 431.3 thousand tons N) and in the Region 2 – (35.1–107.4, 379.3 thousand tons N). In Regions 1–4, the largest values of  $BP_{F2N}$  were recorded in July (0.1540, 0.2076, 0.0892, and 0.2560 grams N/( $m^3 \times month$ )) per unit volume of the upper layer. When calculating the  $F2N$  production values for the entire layer, the increased values of  $BP_{F2N}$  in the Regions 1–4 are for July and October (221.6 and 223.4, 93.4 and 107.4, 93.7 and 111.7, and 144.1 and 76.2 thousand tons N/month). The total values of  $BP_{F2N}$  for the production season in the waters of Regions 1–4 are 770.5, 379.3, 415.2, and 431.3 thousand tons N (Table 6).

The development of  $F3N$  biomass differs from  $F2N$  in the values and dates in the formation of intermediate peaks (the formation of  $F3N$  maxima occurs later and their values are lower). There are also similar features in the dynamics of biomasses  $F3N$  and  $F2N$ : their peaks in time are earlier formed in the waters of Regions 2 and 4 (remoted from the coast) than in coastal Regions 1 and 3 (Fig. 5 c, d).

In Regions 2 and 4, the first intermediate maximum of  $F3N$  biomass ( $6.03 \times 10^{-3}$  and  $5.47 \times 10^{-3}$  mg N/L respectively) is formed on the 219th day at the largest values of  $k_{0F3}$  (0.277 and 0.213  $day^{-1}$  at 201st day). In Regions 1 and 3, the first intermediate maximum of  $F3N$  ( $1.46 \times 10^{-3}$  and  $6.02 \times 10^{-3}$  mg N/L) is formed on the 228th day with the largest values of  $k_{0F3}$  (0.148 and 0.141  $day^{-1}$ ) on the 214th day. Further quickly enough, the  $F3N$  values in all regions are reduced to the first intermediate minimum ( $9.90 \times 10^{-5}$ – $2.63 \times 10^{-4}$  mg N/L).

The second maximum of  $F3N$  in Regions 2 and 4 ( $5.64 \times 10^{-3}$  and  $5.23 \times 10^{-3}$  mg N/L) is fixed on the 260th day with the corresponding largest values of  $k_{0F3}$  (0.436 and 0.383  $day^{-1}$ ), which fall on the 238th day. In the Regions 1 and 3, the second maximum of  $F3N$  ( $2.03 \times 10^{-3}$  and  $1.34 \times 10^{-3}$  mg N/L) was recorded on the 269th day, and the largest values of  $k_{0F3}$  (0.265 and 0.233  $day^{-1}$ ) were also on the 238th day. However, already on the 279th day, the  $F3N$  biomass in waters of all regions is reduced to its second minimum, the values of which fall within the range  $(2.89$ – $9.40) \times 10^{-4}$  mg N/L.

The third intermediate maximum of  $F3N$  in Regions 2 and 4 ( $3.34 \times 10^{-3}$  and  $2.20 \times 10^{-3}$  mg N/L) falls on 293nd day, and the maximum values of  $k_{0F3}$  (0.347 and 0.300  $day^{-1}$ ) on the 279 th day. In Regions 1 and 3, the third maximum of  $F3N$  ( $1.99 \times 10^{-3}$  and  $1.55 \times 10^{-3}$  mg N/L) was recorded on the 298th day at the highest values  $k_{0F3}$  (0.275 and 0.280  $day^{-1}$ ) which also falls on the 279th day. Further by the 308th day, the third intermediate minimum of the  $F3N$  biomass is reached, and their values in all regions lie within the limits  $(3.16$ – $4.10) \times 10^{-4}$  mg N/L. In Regions 1–4 by the end of a year,  $F3N$  biomass values increase to  $1.30 \times 10^{-3}$ ,  $1.67 \times 10^{-3}$ ,  $1.25 \times 10^{-3}$ ,  $8.57 \times 10^{-4}$  mg N/L respectively (Fig. 5d).

It should be noted that each regular maximum of  $F3N$  biomass in the waters of Regions 2 and 4, removed from the coast, becomes lower, and in coastal Regions 1 and 3, on the contrary, higher than the corresponding previous  $F3N$  maximum. There is also a regularity for the following minimum  $F3N$  biomasses: as a whole, each subsequent minimum of  $F3N$  biomass in each region is higher than the it's fixed previous minimum (Fig 5 d).

In the waters of Regions 1–4, the production of  $BP_{F3N}$  is formed in July–December. The ranges of changes in the  $BP_{F3N}$  values for the production period in Regions 1–4 are 0.0007–0.0183, 0.0043–0.0553, 0.0003–0.0095, and 0.0026–0.0497 g N/(m<sup>3</sup>×month) (at total values of 0.0460, 0.1635, 0.0293, and 0.1405 g N/ m<sup>3</sup>). The values of  $BP_{F3N}$  in terms of the volume of the upper layer water in the coastal part of the sea are higher in the Region 1 (1.0–43.9 thousand tons N/month with a total of 143.7 thousand tons N) than in the Region 3 (0.3–19.9, 85.5), and in regions far from the coast – these values are higher in the Region 4 (3.7–45.2, 125.8) than in the Region 2 (4.8–36.6 thousand tons N/month and total 118.6 thousand tons N).

The largest values of  $BP_{F3N}$  in coastal Regions 1 and 3 were recorded in September and October (respectively 0.0183 and 0.0095 g N/ (m<sup>3</sup>×month)), and in Regions 2 and 4, remoted from the coast – in August (0.0553 and 0.0497 g N/(m<sup>3</sup>×month)). When calculating the values of  $F3N$  production for the entire layer, the higher values of  $BP_{F2N}$  in Regions 1, 2, and 4 occur in September (correspondingly 43.9, 36.6, and 45.2 thousand tons N/month), and in the Region 3 – on October (19.9 thousand tons N/month). The total values of  $BP_{F3N}$  in the waters of Regions 1–4 during the production season are 143.7, 118.6, 65.5, and 125.8 thousand tons N, respectively (Table 6).

**The biomass of the herbivorous (Z1N) and predatory (Z2N) zooplankton.** There are significant differences in the zooplankton dynamics of the NESS waters. In each region in the second half of a year, two intermediate maximums of Z1N biomass are created, while only one enough long period of increased values of Z2N biomass is found in summer–autumn with its small fluctuations (some exception is for Region 3 in which a slower development of Z2N biomass is noted as a whole) (Fig. 5 e, f).

In remoted from the coast Regions 2 and 4, the development of Z1N biomass begins earlier than in coastal Regions 1 and 3. The first maximum of Z1N biomass in Regions 2 and 4 ( $3.78 \times 10^{-2}$  and  $3.54 \times 10^{-2}$  mg N/L) was recorded in the 185th day at largest values of  $k_{0Z1}$  (0.551 and 0.528 day<sup>-1</sup>) at 173rd day. The first maximum of Z1N biomass in the Region 1 ( $3.94 \times 10^{-2}$  mg N/L) falls on the 197th day, and in the region 3 ( $1.35 \times 10^{-2}$  mg N/L) - by the 209th day at the largest  $k_{0Z1}$  (0.605 and 0.411 day<sup>-1</sup>) on the 185th day. The intermediate Z1N biomass minimum in all regions, within the limits of  $(0.70–1.60) \times 10^{-2}$  mg N/L, is fixed on the 267th day (Fig. 5 e).

The second maximum of Z1N biomass in the waters of regions 1–4 is  $1.73 \times 10^{-2}$ ,  $2.20 \times 10^{-2}$ ,  $1.72 \times 10^{-2}$ , and  $1.61 \times 10^{-2}$  mg N/L respectively, and is formed on the 305–310th days at the highest values  $k_{0Z1}$  (0.306–0.332 day<sup>-1</sup>) fixed on the 298th day. By the end of a year, the values of Z1N biomass in waters of Regions 1–4 are reduced to  $7.80 \times 10^{-5}$ ,  $2.45 \times 10^{-4}$ ,  $6.40 \times 10^{-5}$ , and  $2.44 \times 10^{-4}$  mg N/L respectively (Fig. 5 e).

Formation of Z1N productions in waters of Regions 1, 2 and 4 is carried out in June–November, and in Region 3 – in June–December. The range of changes in the values of  $BP_{Z1N}$  for Regions 1–4 is 0.0010–0.3985, 0.0845–0.4288, 0.0003–0.1237, and 0.0632–0.6595 g N/(m<sup>3</sup>×month), respectively, with their total values of 0.8423, 1.2797, 0.4661, and 1.6015 thousand tons N. When expressing the Z1N production on the volume of the upper layer water, the ranges of values of  $BP_{Z1N}$  for Regions 1–4 are 1.0–573.4,

47.4–214.8, 1.0–259.8, and 89.0–371.3 thousand tons N/month with the total values for the entire production period respectively, 1694.5, 797.7, 823.1, and 1119.3 thousand tons N. The highest values of  $BP_{Z1N}$  in the waters of Regions 1, 2, and 4 fall in July (0.3985, 0.4288, and 0.6595 g N/(m<sup>3</sup>×month) or 573.5, 193.0, and 371.3 thousand tons N/month), and in the Region of 3 – in October (0.1237 g N/(m<sup>3</sup>×month) or 259.8 thousand tons N/month).

As in the case of Z1N biomass, the development of Z2N biomass begins earlier in Regions 2 and 4 removed from the coast, and the first maximum of Z2N biomass falls in these regions respectively on the 209th and 204th days ( $9.22 \times 10^{-3}$  and  $9.14 \times 10^{-3}$  mg N/L) with the largest values of  $k_{0Z2}$  0.179 and 0.118 day<sup>-1</sup> (on the 197th day). The second maximum of Z2N in these regions is formed respectively on the 281th and 274th days ( $9.48 \times 10^{-3}$  and  $9.04 \times 10^{-3}$  mg N/L) with increased values of  $k_{0Z2}$  on 272 day (0.248 day<sup>-1</sup>) and by 266th day (0.213 day<sup>-1</sup>). In the coastal Regions 1 and 3, the first maximum of the Z2N biomass is formed respectively on the 221st and 257th days ( $4.23 \times 10^{-3}$  and  $2.91 \times 10^{-3}$  mg N/L), and the increased values of  $k_{0Z2}$  are fixed in the specified areas by 209th day (0.242 day<sup>-1</sup>) and on the 250th day (0.162 day<sup>-1</sup>). The second broad maximum of Z2N occurs in Regions 1 and 3, respectively, at 267–293rd days ( $4.33$ – $5.17$ ) $\times 10^{-3}$  mg N/L and at 281–293rd days ( $3.96$ – $4.18$ ) $\times 10^{-3}$  mg N/L at elevated  $k_{0Z2}$  values, fixed in the specified Regions on the 274th day (0.223 day<sup>-1</sup>) and on the 286th day (0.191 day<sup>-1</sup>) (Fig. 5 d).

The formation of Z2N production in the waters of Regions 1 and 3 occurs in July–November and July–December, respectively, and in Regions 2 and 4 – in June–November. The limits of changes in the values of  $BP_{Z2N}$  for Regions 1–4 are 0.0051–0.0267, 0.0003–0.0881, 0.0006–0.0218, and 0.0008–0.0867, g N/(m<sup>3</sup>×month) respectively for the total values of 0.0897, 0.2855, 0.0634, and 0.2687 thousand tons N. At the expression of Z2N production on the volume of the upper layer water, the ranges of values of  $BP_{Z2N}$  for Regions 1–4 are 7.8–76.8, 0.1–61.1, 1.9–45.8, and 0.3–73.0 thousand tons N/month with the total values for the entire production period respectively 216.4, 201.0, 119.2, and 228.9 thousand tons N.

The highest values of  $BP_{Z2N}$  in the waters of coastal Regions 1 and 3 occur in October (0.0267 and 0.0218 g N/(m<sup>3</sup>×month) respectively, or 76.8 and 45.8 thousand tons N/month), and in Regions 2 and 4 offshore – in August, with the expression of  $BP_{Z2N}$  per unit volume of the upper layer water (0.0881 and 0.0867 g N/(m<sup>3</sup>×month)), or in the expression of  $BP_{Z2N}$  for the whole volume of the upper layer water in September (61.1 and 65.1 thousand tons N/month).

### Conclusions

Intra-annual dynamics of the BS concentrations was reproduced in Regions 1–4 (NESS) using the CNPSi-model and the long-term measurements with the monthly mean values of the sea water state parameters (temperature, light intensity, transparency, biogen load, water exchange parameters between Regions 1-4 and open water areas of the Sea of Okhotsk). The parameters of water exchange between regions and the rates of vertical

water exchange between the upper and lower layers were calculated with the help of BOM on the basis of long-term values of the thermohaline parameters of the marine environment averaged for each month. The mean morphometric characteristics of Regions 1–4 of NESS were also used in calculations. The subdivision of the water column into the upper and lower layers was determined during the cold months by the depth of penetration of the winter vertical circulation (100–150 m), and in the warm season – by the warming up of the water column varying from 10–20 m in May to 40–50 m in September.

Calculations showed that the Tym' River annual runoff provides the input of relatively small amount of BS in the marine environment of Region 3: DOC – 5.97 thous. tons of C, DON – 0.12,  $\text{NH}_4$  – <0.01,  $\text{NO}_2$  – <0.01,  $\text{NO}_3$  – 0.08, ND – 0.30 thousand tons of N, DIP and DOP – to 0.02, PD – 0.09 thousand tons of P, DISi – 2.38 thousand tons of Si. During a year, the intensity of BS outflow by the river runoff into the sea waters of Region 3 varies: in May–June, it is ~ 50–79.5% of annual BS discharges, in winter months it decreases to <10%, and in summer and the autumn months – amounts to ~15–25% of the annual river flow.

Bilateral water exchange between regions 1–4 differently forms the nutrient load of each region: in Region 1, the loss of BS for output by the counterflow is substantially lower than their input at the water exchange with neighboring areas; in Regions 2 and 4, the BS input is less than their removal to neighboring areas; in Region 3, the input of BS is higher for some compounds (for DOC, ND, PD,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  and DIP). During a year, the input of BS into the marine environment with atmospheric moisture was the lowest in February (3.6 and 5.0% in relation to annual assessment for Regions 1–2 and 3–4, respectively) and the largest in September (14.1 and 11.5% for these regions).

The main BS input into the marine environment provides an internal recycle and turnover of BS which plays an important role in maintaining the vital activity of organisms and in the development of biohydrochemical processes in the marine environment.

Analysis of modeling results showed significant seasonal differences in the values of BS concentrations, their amplitudes and ratios in waters of Regions 1–4 in this section of the Sakhalin Shelf. In general, in waters of Regions 1–4, smaller changes in the ratios of the suspended components N and P were revealed in comparison with the dissolved and total concentrations of these elements. This is special feature of the sea waters in Region 3 which are influenced by the runoff of Tym' River. It should also be noted that in coastal Regions 1 and 3, the ranges of variability of the ratios of dissolved and total concentrations of N and P are higher than in the waters of Regions 2 and 4 located far from the coast.

The calculated values of biomasses, specific rates of their growth and bioproductions are used for a general characterization of the conditions for the development of organism biomasses in the Regions 1–4. Until the middle of May, biomasses of heterotrophic bacteria *B1N*, phytoplanktons (*F1N*, *F2N*, and *F3N*), and zooplanktons (herbivorous *Z1N*, and predatory *Z2N*) remain low in this area of the Sakhalin Shelf, and the main biomass changes occur from mid-May to late-December. These changes differ in coastal waters (in Regions 1 and 3) and in waters of Regions 2 and 4 (located far from the coast).

During a year in the considered development of organism, two seasonal maxima (in spring, and in autumn) were shown for biomasses of  $B1N$ ,  $F1N$ , and  $Z1N$ . In coastal Regions 1 and 3, between the spring and autumn peaks of organism biomasses, their minimal values are marked. During a year, three-four peaks of the phytoplankton biomasses ( $F2N$  and  $F3N$ ) are formed, as well as one maximum of  $Z2N$  biomass. In the coastal Regions 1 and 3, they are decreased in comparison with Regions 2 and 4. Biomasses of phytoplankton  $F1N$  and  $F2N$  are comparable in terms of the formation dates and their values, and the biomass of phytoplankton  $F3N$  is created later and its values is lower. In Regions 2 and 4, the biomasses of phytoplankton  $F2N$  and  $F3N$  peaks are formed earlier in time than in coastal Regions 1 and 3. The values of successively formed peaks of the  $F3N$  biomasses in Regions 1 and 3 are increased, and in Regions 2 and 4 they are decreased. As a whole in all regions, the each next  $F3N$  biomass minimum between their maximal values are higher than their previous minimal values.

In Region 1, the development of biomass of heterotrophic bacteria  $B1N$  in spring and autumn is characterized by the values  $k_{0B1}$  0.186 and 0.092 day<sup>-1</sup> respectively, and in Region 3 – 0.297 and 0.178 day<sup>-1</sup>. In Regions 2 and 4, the formation of the spring peak of  $B1N$  biomass is characterized by the values of  $k_{0B1}$  0.050–0.056 day<sup>-1</sup>. The autumn peak of  $B1N$  biomass is not expressed here.

Biomass of phytoplankton  $F1N$  is formed in spring with the largest values of  $k_{0F1}$  in Regions 1 and 3 – 0.385 and 0.166 day<sup>-1</sup>, and in autumn – 0.319 and 0.156 day<sup>-1</sup>, respectively. In Regions 2 and 4, the largest values of  $k_{0F1}$  for the development of the  $F1N$  biomass were lower – 0.127–0.125 day<sup>-1</sup> (in spring) and 0.100–0.091 day<sup>-1</sup> (in autumn).

The alternating four maxima of  $F2N$  biomass were formed more rapidly and simultaneously in remoted from the coast regions, and they were characterized in Regions 2 and 4 by the following values of  $k_{0F2}$  – on the 178–183-rd days: 0.498–0.524 and 0.533–0.540 day<sup>-1</sup>; on the 238th day: 0.300 and 0.230 day<sup>-1</sup>; on the 276th day: 0.278 and 0.230 day<sup>-1</sup>; on the 306th day: 0.383 and 0.430 day<sup>-1</sup>. A week later, the same  $F2N$  maxima were formed in the coastal regions, and their formation occurred at the following elevated values of  $k_{0F2}$  in Regions 1 and 3: on the 191st day: 0.431 and 0.520 day<sup>-1</sup>; on the 238th day: 0.389 and 0.330 day<sup>-1</sup>; on the 278th day: 0.377 and 0.416 day<sup>-1</sup>; and on the 308 day: 0.322 and 0.383 day<sup>-1</sup>.

The formation of alternating three maxima of  $F3N$  biomass is also faster in Regions 2 and 4. The following increased values of  $k_{0F3}$  were observed respectively in Regions 2 and 4: 0.277 and 0.213 day<sup>-1</sup> (on 201st day); 0.436 and 0.383 day<sup>-1</sup> (on 238th days); 0.347 and 0.303 day<sup>-1</sup> (on 279th day). The formation of  $F3N$  maxima in the coastal regions occurs with a delay of two weeks, while in the Regions 1 and 3 the following increased values of  $k_{0F3}$  were recorded: 0.148 and 0.141 day<sup>-1</sup> (on the 214th days), 0.265 and 0.233 day<sup>-1</sup> (on the 238th day), 0.275 and 0.280 day<sup>-1</sup> (on the 279th day).

The spring peak of the  $Z1N$  biomass is also formed earlier in the regions remote from the coast. They are characterized by elevated values of  $k_{0Z1}$  in Regions 2 and 4 (respectively 0.551 and 0.528 day<sup>-1</sup> on the 173rd day). In coastal Regions 1 and 3, the largest values of  $k_{0Z1}$  for the spring maximum of  $Z1N$  biomass were fixed on the 185th

day (0.605 and 0.411 day<sup>-1</sup> respectively). In Regions 1–4 for the autumn peak of Z2N biomass, the largest values of  $k_{0Z1}$  were 0.325, 0.332, 0.319, and 0.300 day<sup>-1</sup>, respectively, and these largest values of  $k_{0Z1}$  were noted in the 298th day.

The first maximum of the Z2N biomass is formed earlier in the Regions 2 and 4 remote from the coast, and they are characterized by elevated values of  $k_{0Z2}$  (0.179 and 0.118 day<sup>-1</sup>, respectively, at the 197th day). In the coastal regions, the first maximum of Z2N is formed almost two weeks later, and in Regions 1 and 3, they are characterized by the largest values of  $k_{0Z2}$  (0.242 and 0.162 day<sup>-1</sup>, respectively, recorded on the 209th and 250th days). The second maximum of the Z2N biomass in the waters of Regions 1–4 is characterized by the corresponding largest values of  $k_{0Z2}$  0.223, 0.248, 0.191, and 0.213 day<sup>-1</sup> (they were noted in the indicated regions respectively on the 274th, 272nd, 286th, and 266th days).

The values of the organism production,  $BP_i$ , are positive in the second half of a year. These values characterize the conditions for the development of organism biomasses, and values of  $BP_i$  are calculated in two dimensions for each region on the basis of the sum of the substance fluxes that form the biomass of the considered group of organisms at each step in time: 1. per unit volume of water in the layer under consideration for each month (g of Element/(m<sup>3</sup>×month)) and 2. for the whole water volume of the layer considered (in thousand tons of Element / month). The analysis of biomass development indices showed that each group of organisms are characterized by the values of their activity indicators for a particular period of a year.

### Acknowledgments

This research was performed in the framework of state assignment – theme No. 0149–2018–0015 (Shirshov Institute of Oceanology, RAS) and theme No. 5.9510.2017/8.9 (Sakhalin State University, Russia).

### References

- Berntsen J.* USERS GUIDE for a modesplit s-coordinate numerical ocean model. Bergen: Univ. of Bergen, 2004, p. 51.
- Leonov A.V.* Modelirovanie prirodnyh processov na osnove imitacionnoj gidroekologicheskoy modeli transformacii soedinenij C, N, P, Si: uchebnoe posobie (Modeling of Natural Processes on the Base of Simulation Hydroecological Model of the C, N, P, Si Substance Transformations. Manual Handbook), Uzhno-Sakhalinsk: Sakhalinsk State University, 2012, (In Russian).
- Leonov A.V. and Pishchal'nik V.M.* Biotransformations of Organogenic Substances in the Aniva Bay Waters: Assessment with the Use of Mathematical Modeling. *Water Resources*, 2005a, Vol. 32, No. 5, pp. 508–523, (Original Russian Paper: Leonov A.V., Pishchal'nik V.M. Biotransformaciya organorenyh veshchestv v vodah zaliva Aniva: ocenka s pomosh'yu matematicheskogo modelirovaniya. *Vodnye Resursy*, 2005a, Vol. 32, No. 5, pp. 558–574).
- Leonov A.V. and Pishchal'nik V.M.* Analysis of Conditions of Petroleum Hydrocarbon Transformations in Seawater and Simulation of This Process in Aniva Bay. *Water Resources.*, 2005b, Vol. 32, No. 6, pp. 653–666, (Original Russian Paper: Leonov A.V.,

- Pishchal'nik V.M. Biotransformaciya of neftianyh uglevodorodov v vodah zaliva Aniva: oценка c pomosh'yu matematicheskogo modelirovaniya. *Vodnye Resursy*, 2005b, Vol. 32, No. 6, pp. 712–726.
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., and Zaripov O.M. Modelirovanie prirodnyh processov: sistema otobrazheniya resul'tatov raschetov on CNPSi-vodeli: Uchebnoe posobie. (Modeling of Natural Processes: System for the Visualization of Calculation Results of Obtained by the CNPSi-model. Manual Handbook), Uzhno-Sakhalinsk: Sakhalinsk State University, 2012, (In Russian).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., and Chicherina O.V. Transformations of Biogenic Substances in Tatar Strait Water (the Sea of Japan): Analysis of Mathematical Modeling Results. *Water Resources*, 2010 a, Vol. 37, No. 1, pp. 33–57, (Original Russian Paper: Leonov A.V. et al. Transformaciya biogennyh veshchestv v vodah Tatarskogo proliva (Japonskoe more): analiz resul'tatov matematicheskogo modelirovaniya. *Vodnye Resursy*, 2010 a, Vol. 37, No. 1, pp. 35–59).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., and Chicherina O.V. Modeling of the Marine Environmental Pollution by Petroleum Hydrocarbons and Their Biotransformation in Tatar Strait Waters. *Water Resources*, 2010 b, Vol. 37, No. 2, pp. 220–233. (Original Russian Paper: Leonov A.V. et al. Transformaciya zagriasneniya morskoy sredy neftianymi uglevodorodami i ih biotransformaciya v vodah Tatarskogo proliva. *Vodnye Resursy*, 2010 b, Vol. 37, No. 2, pp. 225–238).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., and Chicherina O.V. Biogeochemistry of Marine Environment Transformations of Biogenic Substances and Oil Hydrocarbons on the Southeastern Sakhalin Shelf. *Water Resources*, 2016, Vol. 43, No. 2, pp. 306–327. (Original Russian Paper: Leonov A.V. et al. Biogehimiya morskoy sredy i osobennosti transformacii biogennyh veshchestv i nephtyannyh uglevodorodov na ugo-vostochnom shelfe Sahalina. *Vodnye Resursy*, 2016, Vol. 43, No. 2, pp. 164–187).
- Leonov A.V. and Sapozhnikov V.V. Biohydrohimicheskaya model' transformacii organogennyh veshchestv i ee ispol'zovanie dlia rascheta pervichnoj produkcii v ekosisteme Ohotskogo moria (Proceedings: Biohydrochemical Model of Organic Substance Transformations and its Applying for Primary Production Calculations in the Okhotsk Sea Ecosystem). Sb.: Kompleksnyye issledovaniya ekosistemy Ohotskogo moria (Complex Studies of the Okhotsk Sea Ecosystem), Moscow: Izdat. VNIRO, 1997, pp. 143–166, (In Russian).
- Luchin V.A. Neperiodicheskie techeniya. Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej. (Aperiodical currents. Hydrometeorology and hydrochemistry of seas). SPb.: Hydrometeoizdat, 1998, Vol. 9: The Sea of Okhotsk, Is. 1: Gydrometeorological conditions, pp. 233–256, (In Russian).
- Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., and Leonov A.V. Reconstruction of the Annual Variations of Thermohaline Characteristics and Water Circulation on the Northeastern Sakhalin Shelf. *Water Resources*, 2014, Vol. 41, No. 4, pp. 385–395. (Original Russian Paper: Pishchal'nik V.M. et al. Vosstanovlenie godovogo hoda termohalinnyh characteristic i cirkulyacii vod na severo-vostochnom shel'fe Sahalina. *Vodnye Resursy*, 2014, Vol. 41, No. 4, pp. 362–374).
- Pishchal'nik V.M. and Bobkov A.O. Okeanograficheskii atlas shel'fovoi zony ostrova Sakhalin (Oceanographic Atlas of the Sakhalin Island Shelf Zone). Yuzhno-Sakhalinsk: Izd. SakhGU, 2000, (In Russian).
- Pishchal'nik V.M. and Leonov A.V. Studying the Ecosystem Functioning Conditions in Aniva Bay – La Peruse Strait. *Water Resources*, 2003, Vol. 30, No. 5, pp. 569–588. (Original Russian Paper: Pishchal'nik V.M., Leonov A.V. Izuchenie uslovij funkcionirovaniya ekosistemy zaliv Aniva – proliv Laperuza. *Vodnye Resursy*, 2003, Vol. 30, No. 5, pp. 616–636).

*Pishchal'nik V.M., Leonov A.V., Arkhipkin V.S., and Melkij V.A. Matematicheskoe modelirovanie uslovij funkcionirovaniya ekosistemy Tatarskogo proliva (Mathematical Modeling of Conditions in the Functioning of the Tatar Strait Ecosystem), Uzhno-Sakhalinsk: SakhGU, 2011, (In Russian).*

## ТРАНСФОРМАЦИЯ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОДАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА САХАЛИНА: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. Леонов<sup>1</sup>, В. М. Пищальник<sup>2</sup>, В.И. Петухов<sup>3</sup>, О.В. Чичерина<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Институт Океанологии им. П.П.Ширшова РАН  
117997, Москва, Нахимовский пр. 36  
<sup>2</sup>693008, Южно-Сахалинск, СахГУ, ул. Ленина 290  
<sup>3</sup>690091, Владивосток, ДВФУ, Ул. Суханова 8  
E-mail: [aleonov@ocean.ru](mailto:aleonov@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.09.2018

Трансформация биогенных веществ в морской среде исследовалась в районах 1–4 в акватории северо-восточной части шельфа Сахалина. Три электронных инструмента использовано для анализа океанографических данных:

1. ГИС «Сахалинский шельф» (для получения данных по термохалинным параметрам морских вод);
2. океаническая динамическая модель Бергенского университета (для оценки скоростей и направлений переноса водных масс через границы районов);
3. гидрoэкологическая CNPSi-модель (для расчетов динамики химико-биологических характеристик и количественной оценки особенностей биогидрохимии морской среды северо-восточной части шельфа Сахалина).

В данном исследовании обсуждается сезонная динамика концентраций органических и минеральных соединений биогенных элементов (N и P) и биомасс организмов (гетеротрофные бактерии, три группы фито- и две зоопланктона). Динамика была воспроизведена на основе долгосрочных среднемесячных значений параметров морской среды (температура, освещенность, прозрачность водной среды, биогенная нагрузка, параметры водообмена). Указанные организмы вовлечены в трансформацию биогенных веществ и обеспечивают их круговорот в водной среде. Анализ изменений концентраций биогенных веществ позволил характеризовать сезонные условия развития биомасс и изменения параметров их активности (на основе оценки удельных скоростей роста биомасс и биопродукции).

**Ключевые слова:** модели для анализа океанологических данных; концентрации биогенных веществ; биомассы организмов низших трофических звеньев – гетеротрофные бактерии, три доминирующих группы фитопланктона, две группы зоопланктона (растительный и хищный); параметры активности организмов (удельные скорости роста, круговорот биомассы, биопродукция)

## Литература

- Berntsen J.* USERS GUIDE for a modesplit s-coordinate numerical ocean model. Bergen: Univ. of Bergen, 2004. P. 51.
- Leonov A.V.* Modelirovanie prirodnyh processov na osnove imitacionnoj gidroekologicheskoy modeli transformacii soedinenij C, N, P, Si: uchebnoe posobie (Modeling of Natural Processes on the Base of Simulation Hydroecological Model of the C, N, P, Si Substance Transformations. Manual Handbook). Uzhno-Sakhalinsk: Sakhalinsk State University, 2012 (In Russian).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M.* Biotransformations of Organogenic Substances in the Aniva Bay Waters: Assessment with the Use of Mathematical Modeling // *Water Resources*. 2005a. Vol. 32. No. 5. P. 508–523. (Original Russian Paper: Leonov A.V., Pishchal'nik V.M. Biotransformaciya organorenyh veshchestv v vodah zaliva Aniva: ochenka s pomosh'yu matematicheskogo modelirovaniya // *Vodnye Resursy*. 2005a. Vol. 32. No. 5. P. 558–574).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M.* Analysis of Conditions of Petroleum Hydrocarbon Transformations in Seawater and Simulation of This Process in Aniva Bay // *Water Resources*. 2005b. Vol. 32. No. 6. P. 653–666. (Original Russian Paper: Leonov A.V., Pishchal'nik V.M. Biotransformaciya of neftnyh uglevodorodov v vodah zaliva Aniva: ochenka s pomosh'yu matematicheskogo modelirovaniya // *Vodnye Resursy*. 2005b. Vol. 32. No. 6. P. 712–726).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., Zaripov O.M.* Modelirovanie prirodnyh processov: sistema otobrazheniya resul'tatov raschetov on CNPSi-vodeli. Uchebnoe posobie (Modeling of Natural Processes: System for the Visualization of Calculation Results of Obtained by the CNPSi-model. Manual Handbook) // Uzhno-Sakhalinsk: Sakhalinsk State University, 2012. (In Russian).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., Chicherina O.V.* Transformations of Biogenic Substances in Tatar Strait Water (the Sea of Japan): Analysis of Mathematical Modeling Results // *Water Resources*. 2010a. Vol. 37. No. 1. P. 33–57. (Original Russian Paper: Leonov A.V. et al. Transformaciya biogennyh veshchestv v vodah Tatarskogo proliva (Japonskoe more): analiz resul'tatov matematicheskogo modelirovaniya // *Vodnye Resursy*. 2010a. Vol. 37. No. 1. P. 35–59).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., Chicherina O.V.* Modeling of the Marine Environmental Pollution by Petroleum Hydrocarbons and Their Biotransformation in Tatar Strait Waters // *Water Resources*. 2010b. Vol. 37. No. 2. P. 220–233. (Original Russian Paper: Leonov A.V. et al. Transformaciya zagriazneniya morskoy sredy neftnyimi uglevodorodami i ih biotransformaciya v vodah Tatarskogo proliva // *Vodnye Resursy*. 2010 b. Vol. 37. No. 2. P. 225–238).
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., Chicherina O.V.* Biogeochemistry of Marine Environment Transformations of Biogenic Substances and Oil Hydrocarbons on the Southeastern Sakhalin Shelf // *Water Resources*. 2016. Vol. 43. No. 2. P. 306–327. (Original Russian Paper: Leonov A.V. et al. Biogehimiya morskoy sredy i osobennosti transformacii biogennyh veshchestv i nephtyannyh uglevodorodov na ugo-vostochnom shelfe Sahalina // *Vodnye Resursy*. 2016. Vol. 43. No. 2. P. 164–187).
- Leonov A.V., Sapozhnikov V.V.* Biohidrohimicheskaya model' transformacii organogennyh veshchestv i ee ispol'zovanie dlia rascheta pervichnoj produkcii v ekosisteme Ohotskogo moria (Biohydrochemical Model of Organic Substance Transformations and its Applying for Primary Production Calculations in the Okhotsk Sea Ecosystem) // *Sb. Kompleksnye issledovaniya ekosistemy Ohotskogo moria (Complex Studies of the Okhotsk Sea Ecosystem)* M.: Izdat. VNIRO, 1997. P. 143–166. (In Russian).

- Luchin V.A.* Neperiodicheskie techeniya // *Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej.* (Aperiodical currents. Hydrometeorology and hydrochemistry of seas) // SPb.: Hydrometeoizdat, 1998. Vol. 9: The Sea of Okhotsk, Is. 1: Gydrometeorological conditions. P. 233–256. (In Russian).
- Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V.* Reconstruction of the Annual Variations of Thermohaline Characteristics and Water Circulation on the Northeastern Sakhalin Shelf // *Water Resources.* 2014. Vol. 41. No. 4. P. 385–395. (Original Russian Paper: Pishchal'nik V.M. et al. Vosstanovlenie godovogo hoda termohalinnyh characteristic i cirkulyacii vod na severo-vostochnom shel'fe Sahalina // *Vodnye Resursy.* 2014. Vol. 41. No. 4. P. 362–374).
- Pishchal'nik V.M., Bobkov A.O.* Okeanograficheskii atlas shel'fovoi zony ostrova Sakhalin (Oceanographic Atlas of the Sakhalin Island Shelf Zone), Yuzhno-Sakhalinsk: Izd. SakhGU, 2000. (In Russian).
- Pishchal'nik V.M., Leonov A.V.* Studying the Ecosystem Functioning Conditions in Aniva Bay – La Peruse Strait // *Water Resources.* 2003. Vol. 30. No. 5. P. 569–588. (Original Russian Paper: Pishchal'nik V.M., Leonov A.V. Izuchenie uslovij funkcionirovaniya ekosistemy zaliv Aniva – proliv Laperuza // *Vodnye Resursy.* 2003. Vol. 30. No. 5. P. 616–636).
- Pishchal'nik V.M., Leonov A.V., Arkhipkin V.S., Melkij V.A.* Matematicheskoe modelirovanie uslovij funkcionirovaniya ekosistemy Tatarskogo proliva (Mathematical Modeling of Conditions in the Functioning of the Tatar Strait Ecosystem). Uzhno-Sakhalinsk: SakhGU, 2011. (In Russian).

## **ВЗВЕСЬ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ**

**В.Н. Лукашин, В.А. Кречик, Е.С. Бубнова, Д.П. Стародымова,  
А.А. Клювиткин**

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва  
e-mail: lukashin@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 02.07.2018, одобрена к печати 18.09.2018

В статье представлены новые данные по химическому составу рассеянного осадочного вещества в Балтийском море. Рассмотрены взвесеобразующие компоненты – аморфный кремнезем, органическое вещество и литогенное вещество, а также Fe, Mn и микроэлементы. Установлена сезонная изменчивость в распределении этих компонентов в водной толще. Изучение химического состава показало сильное обогащение взвеси рядом микроэлементов во всем столбе воды, что объясняется как техногенным загрязнением, так и естественными процессами, проходящими в воде (деградация органического вещества, образование гидрогенных форм Fe и Mn, адсорбция на природных сорбентах). Матричный корреляционный анализ концентраций химических элементов позволил установить связи между элементами.

**Ключевые слова:** взвешенное вещество, химический состав, взвесеобразующие компоненты, микроэлементы, слой кислородного минимума, нефелойдный слой

### **Введение**

Рассеянное осадочное вещество в толще морских вод представлено взвесью, концентрации которой очень малы. Взвесь состоит из терригенных, биогенных и гидрогенных компонентов. Терригенное минеральное вещество поступает в Балтийское море преимущественно с речным стоком, в результате абразии берегов и через атмосферу, как и во все моря умеренной гумидной зоны. Биогенное вещество в основном продуцируется непосредственно в море, а частично поступает также с речной взвесью. Гидрогенные компоненты взвеси (оксигидроксиды Fe и Mn) приносятся частично с речным стоком, а также образуются непосредственно в водной толще в результате физико-химических процессов (коагуляция и флокуляция коллоидов, образование оксигидроксидов при смешении речных и морских вод, а также при диффузии элементов из восстановительной среды в окислительную во впадинах). Изучение рассеянной взвеси и ее компонентов очень важно, так как именно она является тем материалом, который составляет в конечном итоге донные осадки.

Исследование взвеси как геологического объекта в Балтийском море было организовано и началось в конце 60-х–начале 70-х годов прошлого столетия учеными АО ИОРАН и ИОРАН. Они исследовали концентрации взвеси, полученной фильтрационным и сепарационным методами (Емельянов, 1968; Емельянов, Стрюк, 1981; Тамбиев и др., 1984; Емельянов и др., 1986, 1987; Сивков, 2012; Сивков и

др., 2017), ее химический состав (Емельянов, Пустельников, 1975, 1976; Гордеев и др., 1984) с выделением различных форм элементов (Демина, 1984). Иностраные исследователи начали изучать взвесь в Балтике несколько позже и активно занимались геохимическими свойствами взвеси, рассматривая валовые концентрации химических элементов, их легкорастворимые формы, химический состав отдельных минеральных частиц (Bostrom et al., 1981; Brzezinska et al., 1984; Bernard et al., 1988; Brugmann et al., 1992; Ingri et al., 1991; Håkanson L., Eckhéll J., 2008; Bauer et al., 2017 и др.), а также биогенных объектов (Weigel, 1977; Емельянов, 1979; Szefer, 2002; Walve J. et al., 2014 и др.). Много работ было посвящено поведению Mn, Fe и других элементов в зоне минимума кислорода или редокс-клине (Емельянов, 1974; Емельянов, 2011; Емельянов, Пустельников, 1976; Емельянов, Стрюк, 1981; Сивков., Журов, 1991; Boström, Ingri, 1988; Ingri et al., 1991; Neretin et al., 2003; Yakushev et al., 2007; Dellwig et al., 2010; Pohl C., Fernandes-Otero, 2012; Glockzin et al., 2014; Bauer et al., 2017 и др.). Важной задачей было также изучение поставки в море и распределение в воде разного рода антропогенных загрязнений (Szefer, 2002; Szefer, Grembecka, 2009; Falkowska., Beldowska, 2011; Walve et al., 2014; Jedrach et al., 2017; Bagaev et al., 2017; González-Fernández et al., 2018; Li et al., 2018). Таким образом, взвешенное вещество и его химические свойства в Балтийском море к настоящему времени достаточно изучены.

В этой статье на основании данных, полученных в разные сезоны 2015–16 гг., взвесь рассматривается как рассеянное осадочное вещество, являющееся материалом для формирования донных осадков. В соответствии с этим проводится исследование взвесеобразующих компонентов, Fe и Mn, их распределение в водной толще в разные сезоны, степень обогащения химических элементов относительно земной коры, а также их корреляционные связи.

### **Материал и методы исследования**

Материал для исследования был получен в экспедициях, проведенных в разные сезоны 2015–2016 гг. (рис. 1). Это две экспедиции на туноботе «Норд-3» в апреле и августе 2015 г., 64-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» в октябре 2015 г. и 131-й рейс НИС «Профессор Штокман» в марте–апреле 2016 г. Эти экспедиции проводили отбор проб взвеси в пяти точках в разные сезоны вдоль западной границы исключительной экономической зоны (ИЭЗ) России. В августе–сентябре 2016 г. был проведен 32-й рейс НИС «Академик Николай Страхов». Он проходил в три этапа. На первом и третьем этапах отбирались пробы воды на взвесь (см. рис. 1). В табл. 1 приведены сведения о станциях, на которых отбирались пробы. Всего было получено 185 проб взвешенного вещества.

Отбор проб воды для фильтрации взвешенного вещества проводился 10-литровыми батометрами Нискина. Горизонты опробования выбирались прицельно по данным STD- и нефелометрического зондирования. Пробы воды переливались в чистые, специально подготовленные, 10-литровые канистры, из которых осуществлялась фильтрация. Взвесь выделялась мембранной ультрафильтрацией воды

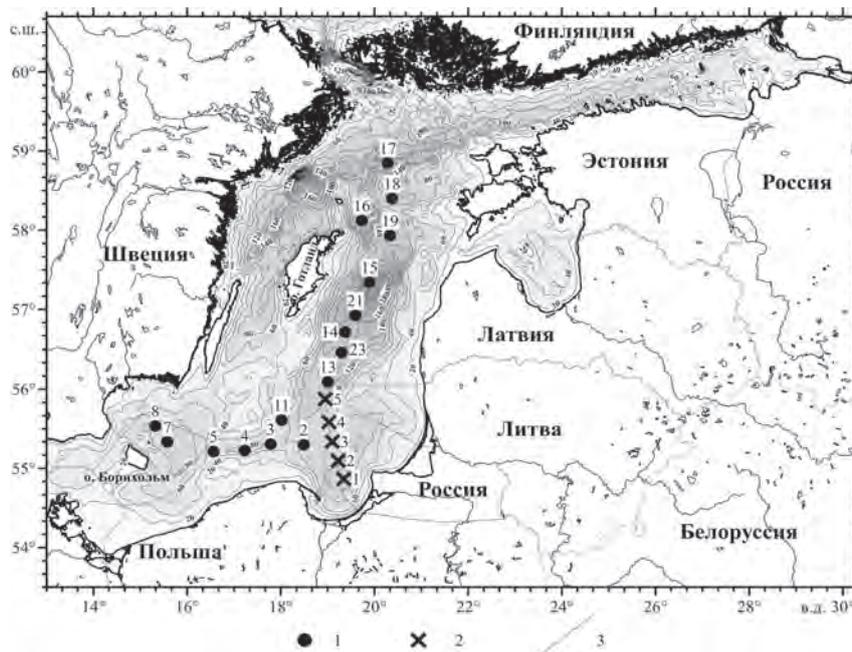


Рис. 1. Карта-схема работ в 2015–16 гг. 1 – местоположение станций отбора взвеси в 32-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов»; 2 – местоположение станций отбора взвеси на разрезе вдоль российской ИЭЗ в 4-х экспедициях судов «Норд-3», «Академик Мстислав Келдыш» в 2015 г. и «Профессор Штокман» в 2016 г.; 3 – границы ИЭЗ

на фильтрационных воронках фирмы Sartorius через ядерные фильтры с размером пор 0,45 мкм и диаметром 47 мм. Фильтрация проб воды проводилась под вакуумом 0,4 атм. Фильтрат сохранялся для определения растворенных форм Fe и Mn. С каждой пробы воды было получено по три параллельных ядерных фильтра и 2 фильтра GF/F фирмы Whatman. Фильтры помещали в чашки Петри и сушили при  $t = 50^{\circ}\text{C}$ . Высушенные фильтры упаковывались и перевозились в береговую лабораторию в ИО РАН. Здесь они распаковывались, выдерживались в эксикаторе, а затем взвешивались на электронных весах Sartorius с точностью до 0,01 мг. Средняя концентрация взвеси (из трех параллельных) рассчитывалась для каждого горизонта каждой станции. Они использовались для построения схем распределения их на разрезах (рис. 2, 3).

Химический состав взвеси определялся в Лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН. Определение основных компонентов химического состава проб взвеси – Si, Al и P – проводилось фотометрическим методом по методике, разработанной в Институте геохимии и аналитической химии РАН (Гельман, Старобина, 1976) в модификации А.Б. Исаевой для взвеси (точность 2–5%) (аналитик Е.О. Золотых). Кулонометрическим методом с использованием анализатора углерода АН 6529 определялся органический углерод ( $C_{org}$ ), точность определения 5–10% (аналитик Л.В. Демина). Карбонатный углерод определить не удалось, т.к. его содержания в большинстве случаев находились в пределах ошибки измерения. Fe, Mn и большой ряд микроэлементов определялись атомно-абсорбционным (Спектр-2) и ICP MS (Agilent 7500) методами с точностью до 10% (аналитики

А.И. Коченкова, Д.П. Стародымова). Для контроля правильности анализов использовались международные стандарты СДО-1, СДО-3 (СССР), GSD-2, GSD-6 (КНР), BCR-414 (Канада).

Таблица 1. Суда, даты и местоположение станций отбора проб взвеси. АМК – Академик Мстислав Келдыш; ПШ – Профессор Штокман; АНС – Академик Николай Страхов

Судно, рейс, станция	Дата, время	Широта, с.ш.	Долгота, з.д.	Глубина, м
Норд-3, 1	25.04.2015, 22:13	54° 51,961'	19° 20,532'	103
2	25.04.2015, 06:25	55° 05,894'	19° 13,442'	100
3	25.04.2015, 12:00	55° 20,251'	19° 05,876'	81
4	25.04.2015, 15:25	55° 35,089'	19° 01,444'	87
5	25.04.2015, 18:30	55° 52,495'	18° 57,165'	106
Норд-3, 1	07.08.2015, 18:00	54° 51,900'	19° 20,575'	106
2	07.08.2015, 14:46	55° 05,905'	19° 13,482'	100
3	07.08.2015, 11:15	55° 20,272'	19° 05,864'	81
4	07.08.2015, 06:46	55° 35,247'	19° 01,466'	86
5	07.08.2015, 02:07	55° 52,493'	18° 57,201'	106
АМК-64, 5272	26.10.2015, 14:17	55° 52,32'	18° 57,122'	105
5284	29.10.2015, 11:50	55° 35,177'	19° 01,572'	91
5285	29.10.2015, 18:17	55° 20,265'	19° 05,868'	78
5286	29.10.2015, 23:29	55° 05,91'	19° 13,53'	102
5287	30.10.2015, 7:27	54° 51,695'	19° 20,484'	110
ПШ-131 131001	31.03.2016, 03:48	54° 51,263'	19° 22,695'	109
131002	31.03.2016, 09:42	55° 05,891'	19° 13,380'	101
131003	31.03.2016, 13:13	55° 20,376'	19° 06,313'	82
131004	31.03.2016, 17:51	55° 35,098'	19° 01,525'	87,5
131011	02.04.2016, 11:14	55° 52,505'	18° 56,148'	107
АНС-32, 1	02.08.2016, 23:00	54° 52,891'	19° 17,755'	104
2	05.08.2016, 02:10	55° 17,865'	18° 29,329'	79
3	05.08.2016, 13:25	55° 18,405'	17° 46,996'	77
4	06.08.2016, 03:04	55° 13,609'	17° 13,900'	86
5	06.08.2016, 15:40	55° 12,830'	16° 33,766'	57
8	07.08.2016, 12:57	55° 32,171'	15° 19,152'	74
7	07.08.2016, 18:23	55° 20,020'	15° 34,647'	94
11	14.08.2016, 18:30	55° 36,573'	18° 01,038'	84
13	05.09.2016, 08:38	56° 05,579'	19° 00,281'	125
14	07.09.2016, 08:40	56° 42,792'	19° 22,556'	138
15	08.09.2016, 06:05	57° 20,501'	19° 53,527'	220
16 (32–258)	09.09.2016, 00:54	58° 07,373'	19° 43,771'	155
17 (32–274)	09.09.2016, 18:58	58° 50,826'	20° 17,186'	180
18 (32–284)	10.09.2016, 07:24	58° 24,020'	20° 22,541'	130
19 (32–300)	11.09.2016, 00:26	57° 55,832'	20° 20,009'	110
21 (32–321)	11.09.2016, 23:41	56° 55,344'	19° 35,495'	155
23 (32–331)	12.09.2016, 11:37	56° 27,827'	19° 17,955'	130

Данные о химическом составе взвеси позволили идентифицировать основные взвесеобразующие компоненты:

1) органическое вещество, индикатором которого является  $C_{org}$ , определялось удвоением значения этой величины;

2) кремнезем кремнистых организмов планктона, индикатором которого служит  $SiO_{2am}$ , определялся методом терригенной матрицы, за терригенную матрицу принимались данные по химическому составу глин и сланцев Русской платформы (Ронов, Ярошевский, 1967);

3) литогенная компонента, индикатором которой является, прежде всего, Al, определялась также через терригенную матрицу умножением значения элемента на 11.6. Полученные данные по взвесеобразующим компонентам, Fe и Mn приведены на рис. 2 и 3.

### Результаты и обсуждение

На основании этих данных были построены схемы распределения концентраций взвеси и взвесеобразующих компонентов – аморфного кремнезема ( $SiO_{am}$ ), органического вещества (ОВ) и литогенного вещества (Литоген), а также Fe и Mn в разные сезоны 2015–2016 гг. на разрезе вдоль западной ИЭЗ России (рис. 2). Такие же схемы были построены для разрезов по Слупскому желобу и в центральной Балтике, выполненных в августе–сентябре 2016 г. в 32-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» (рис. 3).

Для распределения концентраций взвеси характерно их убывание от верхнего квазиоднородного слоя вниз с минимумом в холодном промежуточном слое (ХПС). Некоторое увеличение концентраций в придонном горизонте практически на всех станциях происходит, по-видимому, в результате взмучивания неустойчивого слоя донных осадков и образования 10–15 метровых нефелоидных слоев, распространенных в Балтийском море (Сивков и др., 2017). В центре Готландской впадины (рис. 3б) увеличение концентраций взвеси на глубинах более 150 м (рис. 4, ст. 15) обусловлено также отмеченным здесь нефелоидным слоем, чему соответствуют повышенные концентрации всех взвесеобразующих компонентов.

Такая схема присуща всем сезонам (рис. 2, 3). Однако сезонная изменчивость выражается в величинах концентраций: весной они колеблются от менее 0,2 до 2,14 мг/л, максимальная концентрация отмечается в верхнем слое, а минимальная – в ХПС; летом и ранней осенью концентрации взвеси распределяются более равномерно (0,49–1,81 мг/л), а поздней осенью они минимальны (0,16–0,73 мг/л). Сезонные различия в концентрациях взвеси связаны с сезонной изменчивостью биологических процессов.

В рассеянном осадочном веществе  $SiO_{2am}$  представлен в основном диатомовыми водорослями – преимущественно тонкопанцирными *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros holsaticus*, *Coscinodiscus granii*, *Achnanthesaeniata* и др. Диатомовые имеют весенний и осенний пики цветения. После отмирания скелеты диатомей

быстро, уже в слое фотосинтеза, начинают растворяться. В верхнем деятельном слое вод растворяется до 85% всех скелетных остатков диатомей. Дна достигает всего лишь 1–2% от количества диатомовых, содержащихся в слое фотосинтеза (Емельянов и др. 1986).

Распределения  $\text{SiO}_{2\text{ам}}$  на разрезе показывают уменьшение концентраций с глубиной во все сезоны. Максимальные концентрации 0,26 мг/л отмечены весной в самом верхнем слое водной толщи (цветение диатомовых), затем они резко уменьшаются. Некоторое увеличение наблюдается в придонном горизонте. Летом концентрации  $\text{SiO}_{2\text{ам}}$  значительно ниже (максимальное значение 0,11 мг/л в верхнем слое). В конце октября (поздней осенью) еще ниже, максимум – 0,04 мг/л также в верхнем слое. Таким образом, несмотря на общий характер распределения концентраций  $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ , сезонная изменчивость проявляется в уменьшении концентраций от весны к осени. Повышение концентраций  $\text{SiO}_{2\text{ам}}$  в верхнем слое водной толщи до 0,08 мг/л на разрезах в юго-западной и центральной Балтике связано с осенним цветением диатомовых, происходящим в августе–сентябре (рис. 3). Такие концентрации вдвое выше, чем наблюдавшиеся в октябре 2015 г. (см. рис. 2в). Следует также отметить высокую межгодовую и внутри сезонную изменчивость биомассы диатомовых, описанные Е.К. Ланге (2017).

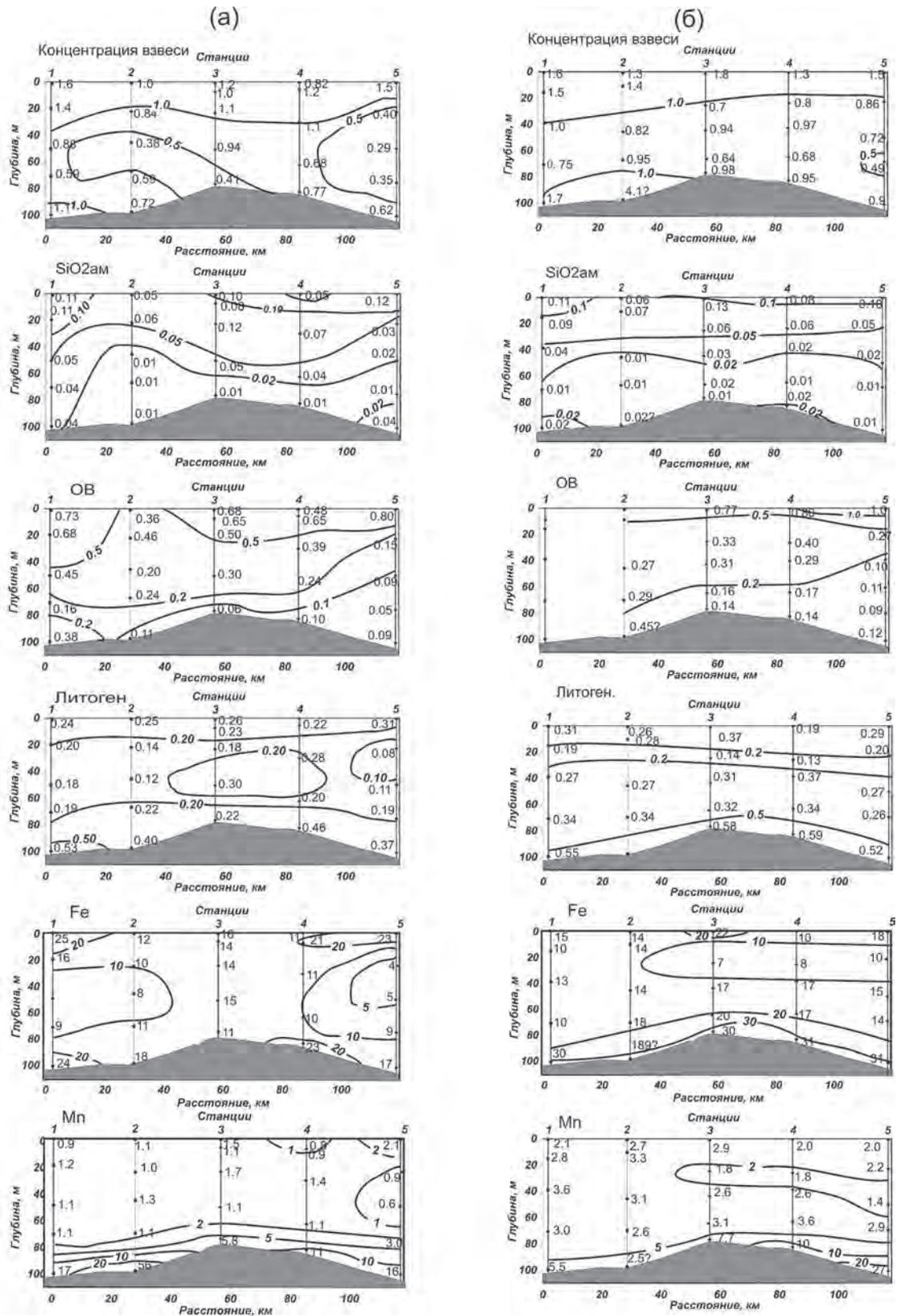
Органическое вещество – наиболее характерный и наиболее распространенный компонент взвеси. Оно представлено привнесенным реками ОВ и автохтонным, состоящим преимущественно из остатков клеток, фитопланктоном. С удалением от речных устьев количество терригенной органики уменьшается. Кроме диатомовых, которые расцветают весной и осенью и являются преобладающими в составе фитопланктона, в водах Балтики летом бурно расцветают синезеленые водоросли. Особенно активны синезеленые водоросли с преобладанием *Aph. flos-aquae* и *N. Spumigena* и более мелких по размеру видов. Массовое развитие синезеленых усиливает седиментацию органического вещества, поскольку они плохо потребляются зоопланктоном из-за способности многих форм образовывать колонии (Кудрявцева, 2017). После отмирания фитопланктона органический детрит спускается вниз и в большом количестве достигает дна. В толще вод и на дне остатки фитопланктона интенсивно разлагаются, способствуя регенерации биогенных веществ, которые в больших количествах скапливаются в глубинных слоях вод (Емельянов, 1986).

Распределение концентраций органического вещества показывает (рис. 2, 3), как и для концентраций  $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ , уменьшение от верхних слоев водной толщи вниз с минимумом в холодном промежуточном слое весной. В другие сезоны уменьшение концентраций ОВ идет до дна. Над отдельными участками дна концентрации немного увеличиваются, что связано с присутствием нефелоидных слоев. Летом концентрации его несколько выше, чем весной и осенью (в сентябре), что обусловлено длительным цветением фитопланктона летом (Кудрявцева, 2017). Поздней осенью концентрации ОВ минимальны во всей толще воды.

Литогенное вещество представлено минеральной частью взвеси, поступающей в моря с речным стоком, в результате абразии берегов или с аэрозолями. Это в основном продукты кислых пород, выносимые реками со Скандинавского щита и Русской платформы, представленные кварцем, обломочными и глинистыми алюмосиликатами (Емельянов, Пустельников, 1976). В составе абиогенной части взвеси встречаются барит, железистые алюмосиликаты, в Датских проливах обнаружен кальцит. Во многих пробах обнаружены также аутигенные железистые и марганцовистые образования (Bernard et al., 1989).

Концентрации литогенного вещества в водной толще Балтийского моря распределяются, в отличие от биогенных компонент, довольно равномерно. Характерной особенностью распределения является минимум в холодном промежуточном слое, где минимальны концентрации самой взвеси (рис. 2, 3). Это закономерно, так как биогенные компоненты в процессе осаждения деградируют, а литогенный материал практически не изменяется. Повышение его концентраций отмечается у дна, что обусловлено влиянием нефелоидных слоев.

Железо и марганец – химические элементы с переменной валентностью, которые в различных физико-химических условиях водной среды могут вести себя по-разному. В осадочных породах железо находится в двух- и трехвалентном состоянии, причем преобладает последняя форма. Марганец в осадочных породах рассматривается как двухвалентный. В процессе миграции эти элементы находятся преимущественно в растворенном состоянии. В окисленном слое морской воды гидрогенную часть Fe и Mn во взвеси представляют оксигидроксиды и адсорбированные формы (Демина, 1982, 1984; Brugmann, 1992 и др.). В морях с высокой первичной продукцией и слабым водообменом с более плотными водами океана или окраинных морей в глубоких впадинах возникают восстановительные условия с присутствием сероводорода. Попадая в восстановительную среду, оксигидроксиды этих элементов переходят в состояние низших валентностей и растворяются. Связанные с ними (адсорбированные, соосажденные) микроэлементы также переходят в раствор. Концентрации растворенных форм в восстановленной среде резко увеличиваются. Возникает диффузия растворенных форм элементов вверх и происходит микробальное окисление Fe и Mn, оксигидроксиды которых обогащаются рядом микроэлементов. Они могут быть в виде аморфных оксигидроксилов, аморфных соединений с фосфором, но основная часть их находится в органической матрице, что замедляет их скорость осаждения (Neretin et al., 2003, Yakushev et al., 2007; Dellwig et al, 2010; Pohl, Fernández-Otero, 2012; Glockzin, 2014; Bauer et al, 2017 и др.). Наши данные показывают, что в этой зоне несколько повышаются концентрации органического вещества, по-видимому, за счет микробальной органики (рис. 2).



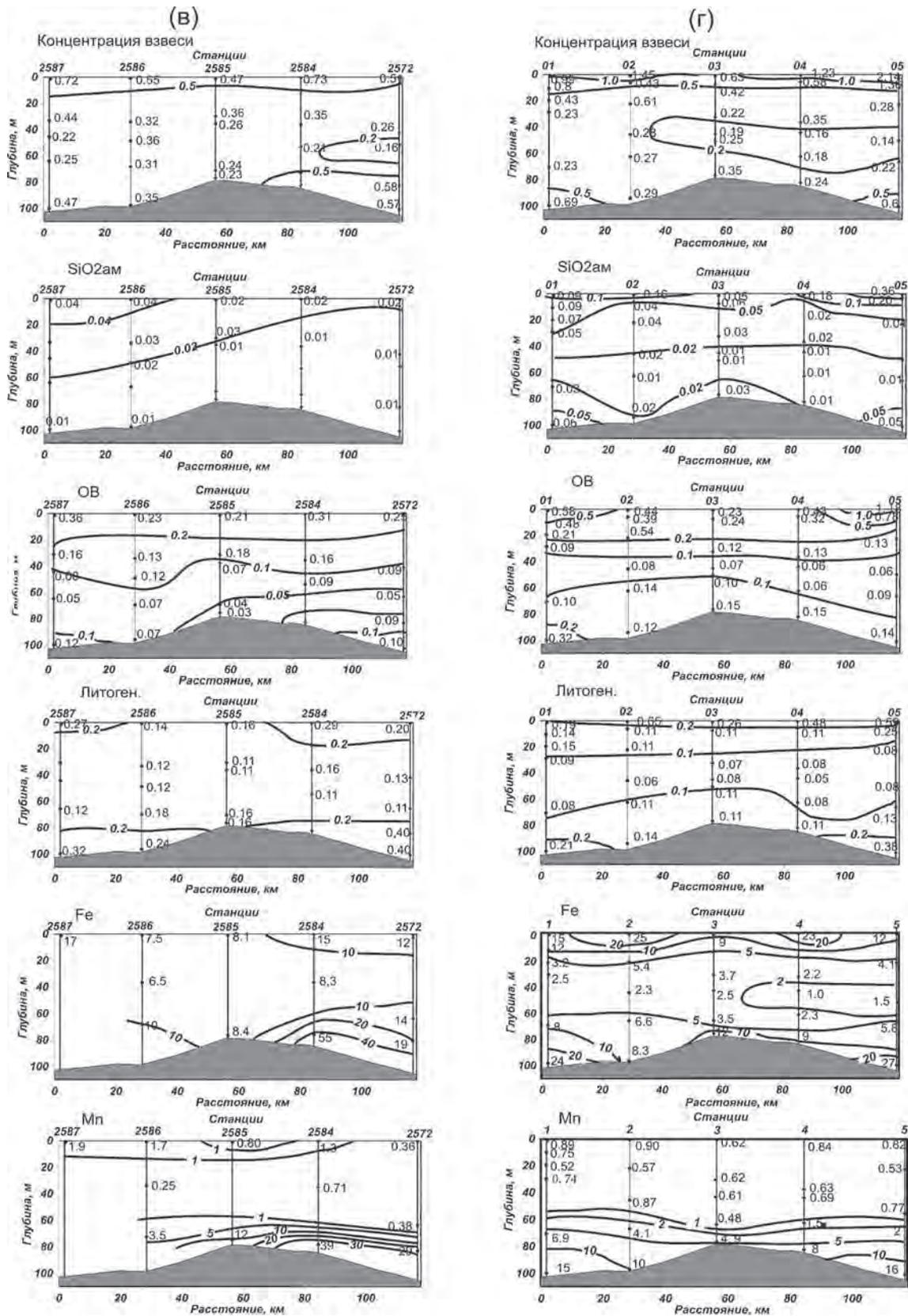


Рис. 2. Распределение концентраций взвеси и взвесеобразующих компонентов (мг/л), Fe и Mn (мкг/л) на разрезе вдоль экономической зоны России в апреле (а), августе (б) и октябре 2015 г. (в), в марте-апреле 2016 г. (г)

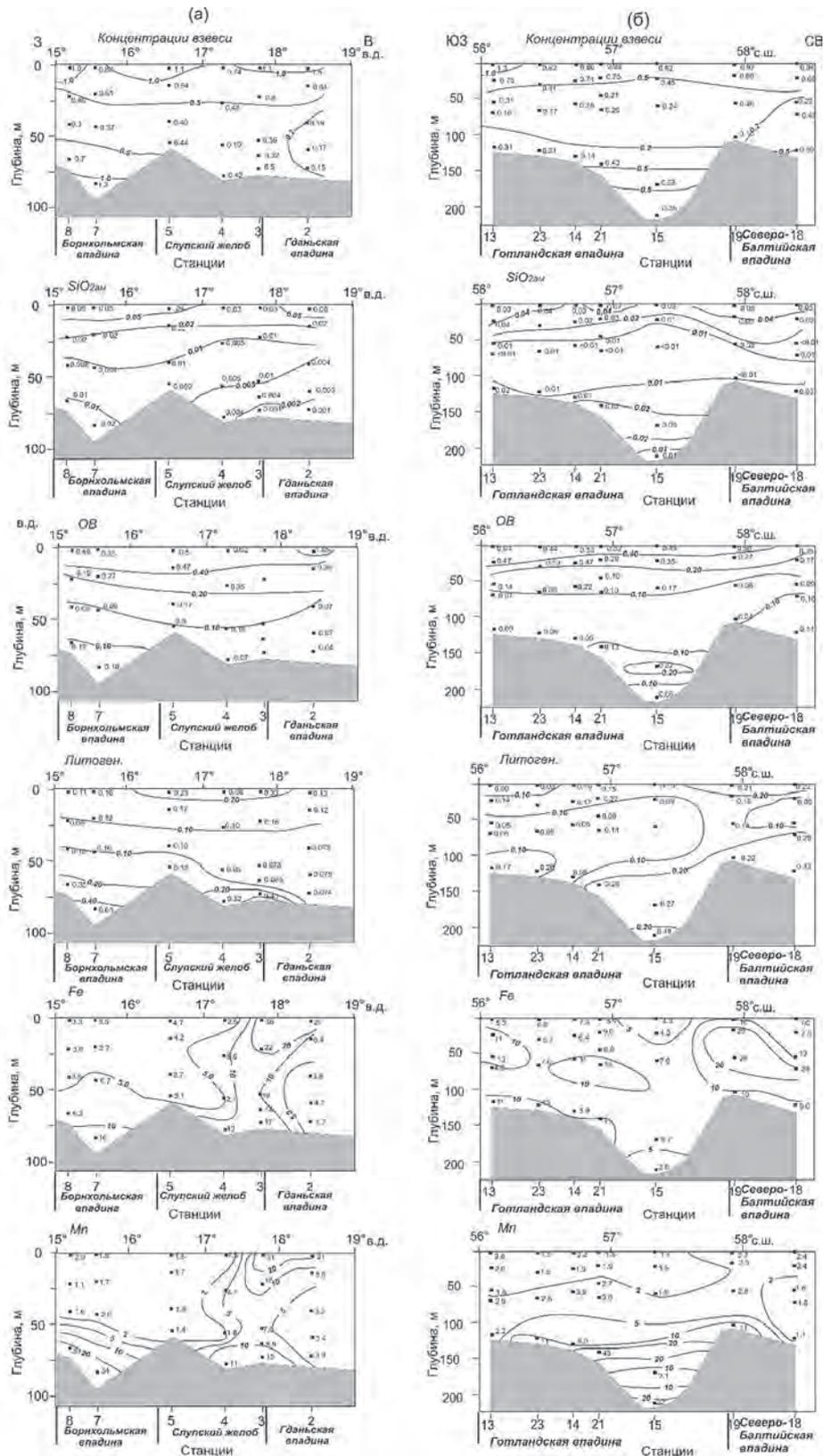


Рис. 3. Распределение концентраций взвеси и взвесеобразующих компонентов (мг/л), Fe и Mn (мкг/л) на разрезах от Борнхольмской впадины через Слупский желоб в Гданьскую впадину (а) и через Готландскую впадину до Северо-Балтийской впадины (б), по данным, полученным августе–сентябре 2016 г. в 32-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов»

Концентрации Fe в водной толще варьируют от 0,9 мкг/л в верхнем слое водной толщи в августе 2015 г. до 144 мкг/л в галоклине южного склона Готландской впадины (75 м) осенью 2015 г. Такое увеличение связано, вероятно, с затоком обогащенных кислородом вод Борнхольмской впадины, инициирующим окисление Fe и Mn, диффундирующих из восстановленного слоя воды. Содержание железа во взвеси колеблется в пределах 0,34–7,5%, невысокие содержания также в верхнем квазиоднородном слое воды, а высокие (>3%) – обнаружены в галоклине, в слое кислородного минимума. Распределение железа и марганца на разрезах представлено на рис. 2.

Концентрации Mn варьируют от 0,25 до 39 мкг/л, по содержанию во взвеси – от 0,04 до 9,9%. Низкие значения (< 0,1%) обнаружены в верхних горизонтах вод моря. По мере погружения осадочного вещества, концентрации Mn увеличиваются (рис. 2). Наиболее высокие значения обнаружены в рассеянном осадочном материале слоя кислородного минимума в галоклине Гданьской и Готландской впадин с максимумом в октябре 2015 г. Над южным склоном Готландской впадины наблюдались наибольшие значения концентраций Mn с высокими градиентами изменения концентраций в галоклине. По-видимому, это связано с проявлением зимнего залива (Кречик и др., 2017).

В Борнхольмской впадине и Слупском желобе (рис. 3а) концентрации Fe намного выше (2,1–36 мкг/л) и увеличиваются сверху вниз. Максимальные концентрации наблюдаются в пределах Слупского желоба, что обусловлено высокими скоростями (до 22 см/с в 1 м от дна) течения североморских вод и взмучиванием или неотложением осадков (Емельянов и др., 2004; Vulczak et al., 2015). На выходе в Гданьскую впадину концентрации Fe резко уменьшаются, как и концентрации самой взвеси из-за уменьшения скоростей течений и выпадения значительной части взвеси. Схема распределения концентраций Mn практически повторяет распределение концентраций взвеси и Fe, что обусловлено близостью их свойств в окислительной среде.

На рис. 3б, представляющем разрез через всю Готландскую впадину и часть Северо-Балтийской впадины, концентрации Fe и Mn в первой увеличиваются по мере осаждения взвеси. Это связано, по-видимому, с процессами в слое минимума кислорода и в восстановленной зоне. Максимальная концентрация Mn 43 мкг/л обнаружена над западным склоном впадины (ст. 21), здесь же и достаточно высокая концентрация Fe. В центре впадины концентрации Fe и Mn уменьшаются (ст. 15), хотя остаются высокими. Это обусловлено присутствием нефелоидного слоя, отмеченного на горизонтах отбора проб (см. рис. 4), и несущего взмученные осадки впадины, обогащенные этими элементами – карбонатами Mn, сульфидами Fe (Емельянов, 2011). На этих станциях отмечены повышенные содержания всех взвесеобразующих элементов (см. рис. 3б). Над возвышенностью, разделяющей впадины, в верхних и средних слоях воды концентрации Mn и особенно Fe выше, чем над впадинами, из-за поступления осадочного материала с близких склонов островов Готланд и Сааремаа. Это подтверждается значениями отношения Fe/Mn близкими к значениям в окисленных донных осадках (Емельянов, 2017).

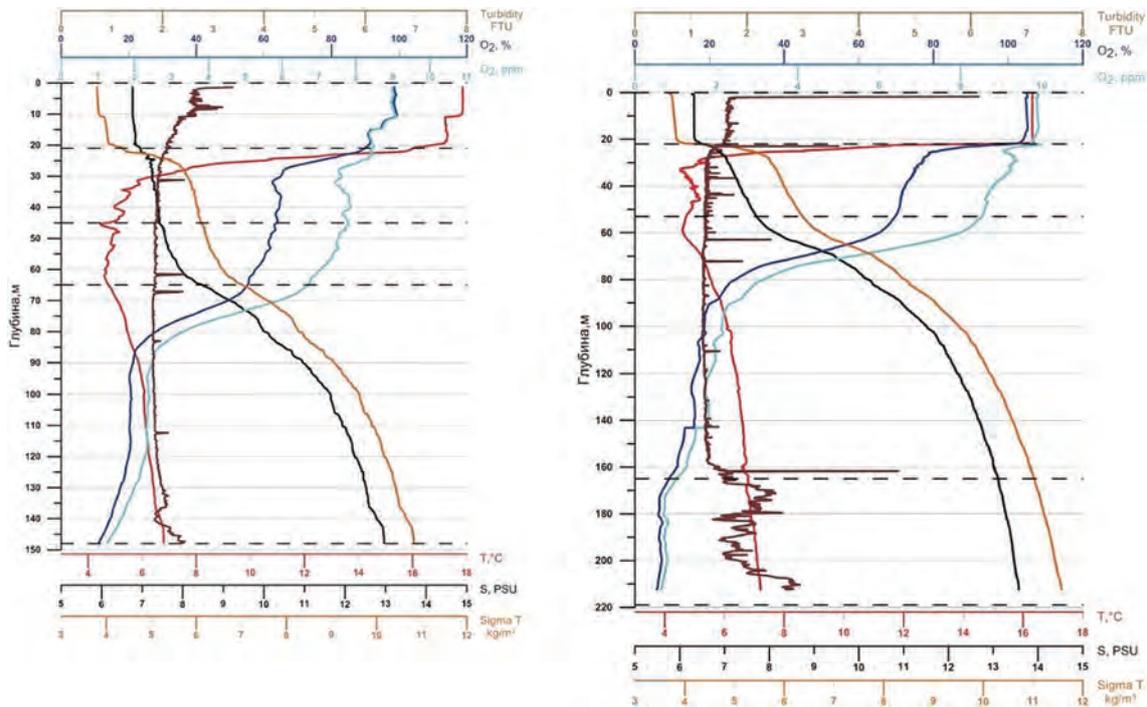


Рис. 4. Вертикальные профили зондирования мультипараметрическим зондом STD 90M на станциях 21 и 15 (АНС-32)

Были определены также растворенные формы Fe и Mn атомно-абсорбционным методом в пробах трех рейсов вдоль западной границы нашей экономической зоны (рис. 5), что позволило рассмотреть формы этих элементов в пробах. Методом терригенной матрицы были выделены литогенная и гидрогенная формы железа и марганца во взвеси. За терригенную матрицу приняты средние значения содержаний этих элементов в осадочных породах (глинах и сланцах) земной коры (Ронов, Ярошевский, 1967; Rudnick, Gao, 2003). Превышение значений во взвеси относительно терригенной матрицы рассматривалось как гидрогенная форма. Распределение литогенной и гидрогенной форм этих элементов на разрезе для весны и осени показано на рис. 5 (а). Видно, что у железа во взвеси преобладает литогенная форма, хотя ее содержания значительно уменьшаются в придонных водах из-за поступления растворенного Fe из восстановленной зоны и окисления. У марганца всегда преобладает гидрогенная форма, содержание которой в придонных водах приближается к 100%.

На рис. 5 (б) показаны средние соотношения растворенной, гидрогенной и литогенной форм Fe и Mn для всей толщи воды. Видно, что у железа преобладает растворенная форма – 49,5%, немного меньше доля литогенной формы – 38,9% и значительно меньше составляет гидрогенная форма. Среди форм марганца преобладает гидрогенная форма – 58,7%, затем растворенная – 49,1%, а литогенная форма составляет всего 0,2%. Достаточно близкие результаты были получены Л.Л. Деминой (1984) по материалу, собранному в 26А рейсе НИС «Академик Курчатов» летом 1978 г.

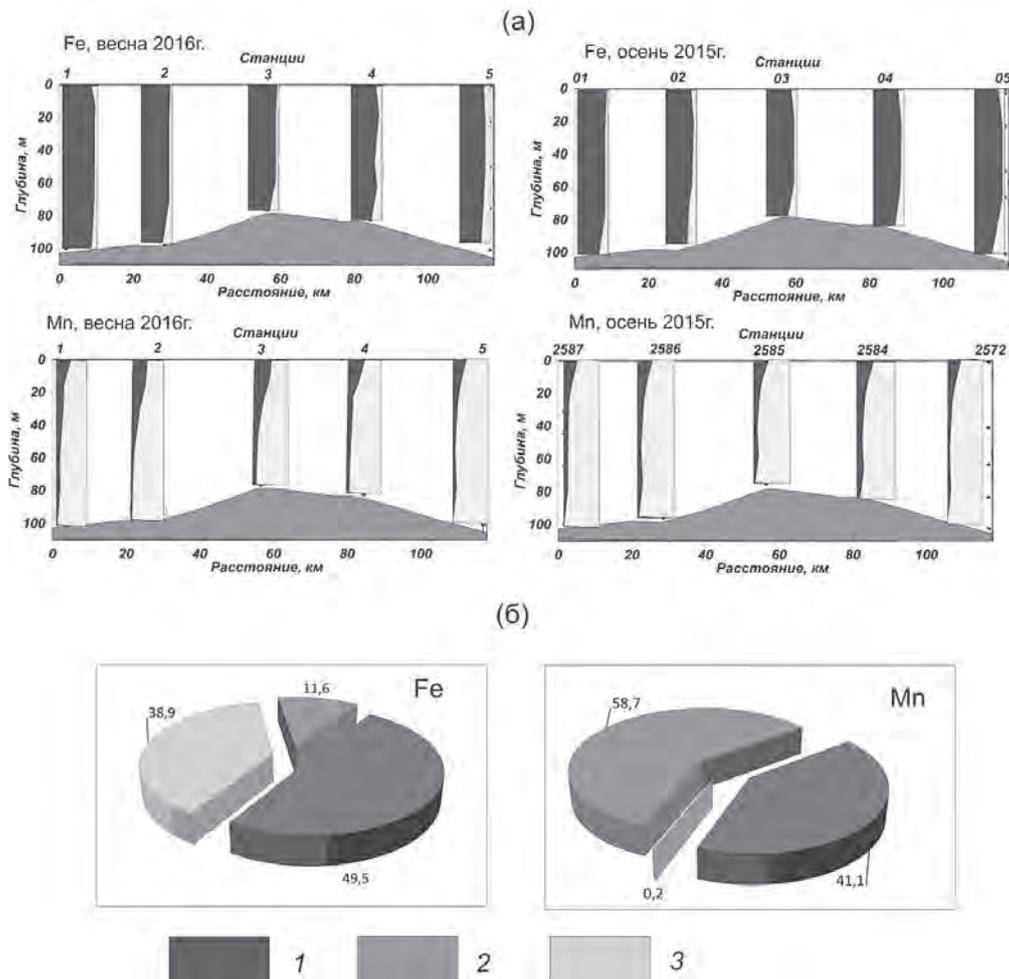


Рис. 5. Распределение литогенной и гидрогенной форм Fe и Mn на разрезе вдоль западной границы российской ИЭЗ весной 2016 и осенью 2015 гг. (а), черным выделена литогенная форма, и средние соотношения растворенной, гидрогенной и литогенной форм Fe и Mn для всей толщи воды (б). 1 – растворенная форма: 2 – гидрогенная форма: 3 – литогенная форма

Рассеянное осадочное вещество водной толщи Балтики изучалось на большом ряду микроэлементов. Пробы взвеси были проанализированы с использованием разных аналитических методов, включая ICP MS (см. выше). По полученным данным рассчитывались средние значения концентраций химических элементов для всех проб в каждом слое водной толщи и определены стандартные отклонения S.d. (табл. 2). В первой графе таблицы указаны количества образцов взвеси (n), проанализированных в каждом слое водной толщи моря. Эта таблица позволяет провести сравнение концентраций элементов в разных слоях воды и выявить аномальные значения, связанные как с природными процессами, так и с техногенными загрязнениями.

Таблица 2. Средние концентрации химических элементов и стандартные отклонения (S.d.) во взвеси в верхнем квазиоднородном слое (ВКС), холодном промежуточном слое (ХПС) и глубинных водах (Si, Al, Si<sub>ам</sub>, С<sub>орг</sub>, Mn и Fe – в %, остальные – в 10<sup>-4</sup>%)

Водные массы, п	Значения	Si	Al	Si <sub>ам</sub>	С <sub>орг</sub>	P	Li	Sc	V	Cr	Mn
ВКС, 82	Среднее	8,98	2,04	2,81	25,8	0,54	4,2	7,7	11	52	0,20
	S.d.	2,8	0,72	1,6	6,7	0,15	2,7	4,7	10,8	19	0,11
ХПС, 53	Среднее	11,48	3,22	1,79	18,0	0,52	8,4	8,4	23	69	0,80
	S.d.	3,39	1,1	1,67	6,8	0,14	6,5	4,0	16	40	0,66
Глубинная, 50	Среднее	16,4	4,87	1,78	13,3	0,58	6,2	9,4	42	82	2,16
	S.d.	3,1	1,2	1,4	6,4	0,36	5,6	6,7	32	58	1,8
Химические элементы		Fe	Co	Ni	Cu	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Y
ВКС	Среднее	1,23	3,2	74	138	9,1	3,5	7,5	5,5	320	2,1
	S.d.	0,77	2,6	41	99	5,7	1,7	4,4	5,0	182	1,8
ХПС	Среднее	2,52	12	102	174	16	5,2	4,4	5,2	179	5,4
	S.d.	1,78	9	66	124	7,2	1,7	1,9	1,7	104	3,2
Глубинная	Среднее	3,28	13	104	173	17	2,9	15	11	328	7,0
	S.d.	1,78	8,6	66	96	10	1,8	7,6	9	198	4,7
Химические элементы		Mo	Ag	Cd	Cs	Ba	REE	Pb	Bi	Th	U
ВКС	Среднее	9,2	2,2	1,8	1,1	197	23	85	1,2	1,6	2,1
	S.d.	5,5	1,9	1,1	0,5	118	21	64	0,71	1,2	1,1
ХПС	Среднее	17	4,2	3,0	1,7	389	45	256	2,6	3,1	2,8
	S.d.	12	4,1	1,8	0,7	156	30	235	1,8	2,4	1,3
Глубинная	Среднее	42	3,0	4,0	1,9	337	56	132	2,0	3,6	5,3
	S.d.	33	3,0	3,3	0,9	165	35	93	1,8	2,8	3,9

Для выделения каких-либо аномалий были рассчитаны коэффициенты обогащения (КО) элементов относительно их средних значений в земной коре. Они рассчитываются по отношению нормализованных по Al элементов во взвеси и земной коре (Rudnic, Gao, 2004). Коэффициенты обогащения рассчитывались для верхнего квазиоднородного слоя, холодного промежуточного слоя и глубинных вод (гало-клин и придонные воды) (рис. 6).

Обогащение взвеси микроэлементами может быть обусловлено рядом процессов, таких как биоассимиляция, соосаждение с образующимися водородными компонентами взвеси – оксигидроксидами Fe и Mn, адсорбция на природных сорбентах. В этих процессах участвуют и техногенные частицы, поступающие в море с речным стоком и через атмосферу и в значительной степени обогащающие взвесь.

Рисунок 6 показывает, что химические элементы, связанные с литогенным веществом взвеси (Rb, V, REE, Co, Th, Si, Fe, Sc, Cr, Ga и др.), во всех слоях водной

толщи ее практически не обогащают. Некоторое обогащение взвеси ( $KO > 3$ ) отмечается во всей толще у U, Ni и Ge. Такие элементы как Pb, Bi, P, Cu, Mo, Mn, Ag и Cd обогащают взвесь более, чем в 10 раз. Столь высокое обогащение для P происходит за счет вхождения в состав органического вещества планктона. Максимальное обогащение им отмечается в верхнем квазистационарном слое ( $KO=33$ ). С глубиной, по мере деградации органического вещества, степень обогащения P снижается с минимумом ( $KO=15$ ) в глубоких слоях, где содержания его остаются повышенными, что связано, вероятно, с концентрированием в коллоидных оксигидроксидах железа (Dellwig et al., 2010). Марганец обогащает взвесь за счет образования его гидrogenной формы (оксигидроксилов), которая значительно преобладает во взвеси и содержание ее увеличивается сверху вниз (см. выше). Таким же образом увеличиваются значения  $KO$  – от 16 в верхнем слое до 47 в глубинных водах.

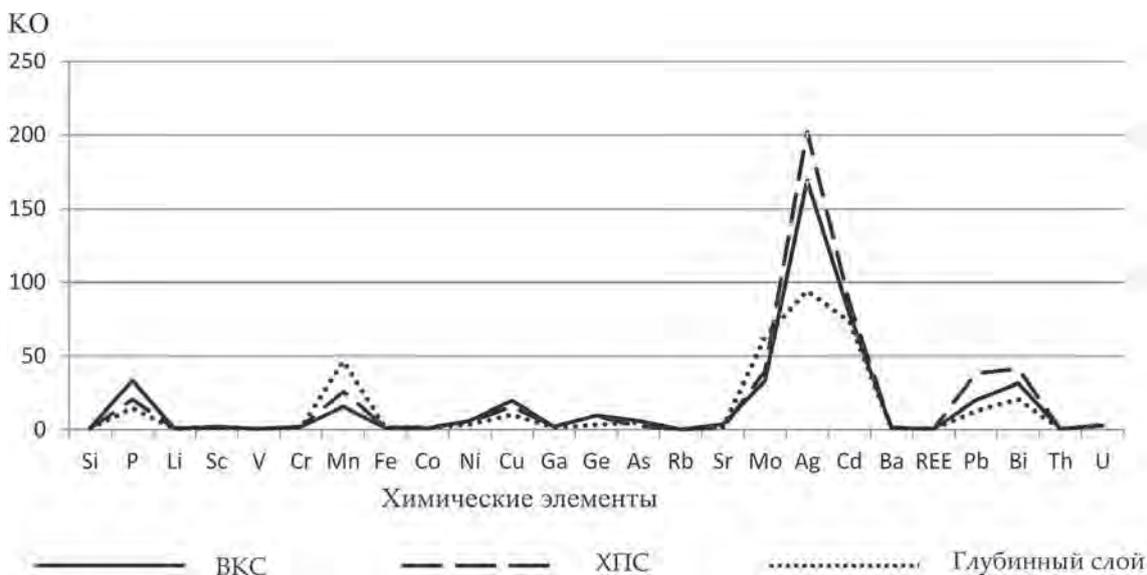


Рис. 6. Распределение коэффициентов обогащения химических элементов во взвеси верхнего квазиоднородного слоя, холодного промежуточного слоя и галоклина и придонных слоев

Высокие  $KO$  во всей толще воды у Cu (10–20), Bi (21–40), Pb (13–38), Mo (33–63), Cd (74–86), Ag (94–202) связаны с техногенными загрязнениями. Приблизительно такие же степени обогащения микроэлементами донных осадков южной Балтики были получены польскими учеными (Szefer, Grembecka, 2009). Загрязнения представлены, в основном, продуктами сгорания топлива, используемого в самых различных производствах, газообразные отходы металлургической, нефтехимической и химической промышленности, удобрения, пестициды и др. (Расуна, 1998; Szefer, 2002; Falkowska, Beldowska, 2011 и др.), поступающие в море через атмосферу и с речным стоком. Следует отметить, что с 60–70-х годов прошлого века поступление кадмия, свинца и ртути на поверхность моря из атмосферы уменьшилось к настоящему времени почти в 10 раз (Falkowska., Beldowska, 2011).

Таблица 3. Корреляционные соотношения между химическими элементами в рассеянном осадочном веществе в толще вод Балтийского моря

	Si	Al	Cope	P	Li	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Ge	As	Rb	Y	Mo	Ag	Cd	Cs	Ba	REE	Pb	Bi	Th	U
Si	1																										
Al	0,88	1																									
Cope	0,24	0,09	1																								
P	0,68	0,66	0,32	1																							
Li	0,59	0,58	0,25	0,69	1																						
Sc	0,71	0,69	0,00	0,09	-0,02	1																					
V	0,74	0,75	-0,02	0,16	0,14	0,85	1																				
Cr	0,51	0,48	0,21	0,20	0,35	0,75	0,59	1																			
Mn	0,17	0,21	-0,10	-0,04	-0,02	0,31	0,51	0,29	1																		
Fe	0,67	0,74	0,12	0,20	0,30	0,79	0,60	0,66	0,43	1																	
Co	0,63	0,65	-0,09	0,18	0,08	0,85	0,71	0,74	0,50	0,89	1																
Ni	0,25	0,24	0,46	0,21	0,30	0,37	0,08	0,39	0,26	0,31	0,18	1															
Cu	0,22	0,24	0,21	0,07	0,03	0,77	0,25	0,51	0,23	0,55	0,50	0,39	1														
Ge	0,71	0,67	0,32	0,61	0,15	0,80	0,61	0,58	-0,06	0,24	0,52	0,49	0,26	1													
As	0,90	0,90	0,09	0,98	0,77	0,24	0,19	0,38	0,00	0,67	0,69	0,27	0,77	0,00	1												
Rb	0,67	0,65	0,09	0,47	0,58	0,56	0,52	0,45	0,10	0,29	0,33	0,08	0,02	0,24	0,51	1											
Y	0,84	0,84	0,02	0,33	0,16	0,90	0,87	0,76	0,33	0,76	0,79	0,15	0,50	0,56	0,74	0,71	1										
Mo	0,14	0,16	-0,15	-0,03	-0,06	0,23	0,17	0,46	0,59	0,25	0,30	0,09	0,13	-0,01	0,12	0,00	0,07	1									
Ag	-0,04	-0,04	0,07	0,08	-0,04	0,20	-0,13	0,23	-0,02	0,11	0,00	0,33	0,28	0,38	0,55	-0,09	-0,10	0,06	1								
Cd	0,13	0,14	0,01	0,08	0,02	0,18	-0,05	0,38	0,10	0,40	0,19	0,40	0,52	0,05	0,42	0,04	-0,03	0,18	0,46	1							
Cs	0,75	0,76	0,12	0,23	0,88	0,38	0,42	0,36	0,11	0,50	0,24	0,25	0,12	0,13	0,39	0,80	0,53	0,00	-0,01	0,13	1						
Ba	0,79	0,75	0,17	0,43	0,33	0,84	0,77	0,58	0,23	0,46	0,56	0,25	0,14	0,71	0,82	0,60	0,76	0,14	0,03	0,22	0,44	1					
REE	0,85	0,87	-0,05	0,25	0,24	0,93	0,86	0,80	0,32	0,80	0,81	0,17	0,57	0,81	0,15	0,79	0,93	0,07	-0,05	0,10	0,86	0,67	1				
Pb	0,01	0,02	-0,01	0,01	-0,02	0,64	0,02	0,70	0,22	0,17	0,11	0,13	0,40	0,40	0,35	-0,02	0,03	0,12	0,15	0,11	0,07	0,08	0,04	1			
Bi	0,29	0,27	0,25	0,09	0,05	0,85	0,19	0,84	0,20	0,52	0,34	0,46	0,67	0,69	0,37	0,17	0,33	0,08	0,41	0,43	0,30	0,37	0,43	0,61	1		
Th	0,70	0,70	0,00	0,14	0,14	0,94	0,84	0,75	0,30	0,77	0,81	0,14	0,53	0,64	0,26	0,95	0,95	0,07	-0,07	0,01	0,78	0,71	0,97	0,04	0,40	1	
U	0,83	0,83	0,03	0,37	0,31	0,91	0,81	0,78	0,31	0,88	0,85	0,28	0,56	0,64	0,85	0,79	0,92	0,15	0,01	0,25	0,81	0,73	0,96	0,04	0,44	0,93	1

Для выявления взаимосвязи между химическими элементами и определения компонентов-носителей тех или других микроэлементов была построена корреляционная матрица (табл. 3), значимые коэффициенты корреляции выделены полужирным шрифтом. Высокий коэффициент корреляции у Si и Al свидетельствует об их совместном нахождении в обломочных алюмосиликатах, представляющих основную массу литогенной части рассеянного осадочного вещества. С этими элементами тесно связаны другие литофильные элементы Fe, Li, Sc, V, Cr, Co, редкоземельные элементы, Th и другие. Корреляции между Fe, Ni, Cr, Co и рядом других микроэлементов обусловлены их совместным вхождением в состав литогенного обломочного вещества, а также высокой сорбционной способностью гидrogenных форм Fe во взвеси. С Mn коррелируют только Co и Mo, что свидетельствует, по-видимому, об их накоплении во взвеси в нижней части столба воды, в слое кислородного минимума (Bauer et. al., 2017). Корреляция с высоким уровнем достоверности отмечалась между Pb и Sc, Cr, между Ag и As, Cu и Cd, а также корреляции между другими микроэлементами, что указывает на совместное поступление и нахождение этих элементов в море, связанное с техногенным загрязнением.

### Заключение

Таким образом, для распределения взвесеобразующих компонентов характерно следующее. В верхнем квазиоднородном слое во все сезоны (весна, лето, осень) отмечены максимальные содержания ОВ и минимальные – литогенного вещества, Fe и Mn. В холодном промежуточном слое содержание биогенных компонент уменьшается, а литогенной – остается практически неизменным, возрастая лишь в придонных горизонтах из-за присутствия нефелоидного слоя. В придонном горизонте содержание SiO<sub>2ам</sub> становится минимальными, а ОВ немного увеличивается. Сезонная изменчивость проявляется в уменьшении концентраций от весны к осени для SiO<sub>2ам</sub>, для ОВ максимум наблюдался летом, что обусловлено сезонностью биологических процессов.

Концентрации железа распределяются примерно как литогенное вещество, и увеличиваются в придонном горизонте, а концентрации марганца в поверхностной взвеси минимальны и с глубиной возрастают, а в придонном слое, слое кислородного минимума резко увеличиваются. Это связано с диффузией его из восстановленного слоя и микробиальным окислением. Для Fe этот процесс в концентрациях выражен слабее.

Изучение других химических элементов показало сильное обогащение взвеси рядом микроэлементов, что объясняется как техногенным загрязнением, так и процессами, проходящими непосредственно в море. Матричный корреляционный анализ концентраций химических элементов позволил установить связи между элементами, показывающими их основных природных и техногенных носителей.

Экспедиционные исследования поддерживались грантом РФФИ 14-27-00114-П, а его обработка и написание статьи выполнены в рамках государственного задания, проект № 0149-2018-0016.

### Литература

- Демина Л.Л. Формы миграции тяжелых металлов в океане. М.: Наука, 1982. 120 с.
- Демина Л.Л. Формы нахождения некоторых тяжелых металлов в водах Балтийского моря // Геологическая история и геохимия Балтийского моря / Под ред. А.П. Лисицына. М.: Наука, 1984. С. 55–64.
- Емельянов Е.М. Количественное распределение морской взвеси у побережья Самбийского полуострова Куршской косы (Балтийское море) // Океанологические исследования. 1968. № 18. С. 203–213.
- Емельянов Е.М. Распределение элементов (Fe, Al, Ti, Mn, Cu, Ni, Co) во взвеси Балтийского моря // Вопросы четвертичной геологии Прибалтики. Рига: Зинатне, 1974. № 7. С. 81–99.
- Емельянов Е.М. Железомарганцевый рудный процесс в Балтийском море // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 3. С. 227–248.
- Емельянов Е.М. Донные осадки: распределение, гранулометрия, минералогия, геохимия // Система Балтийского моря. М.: Научный мир, 2017. С. 380–474.
- Емельянов Е.М., Гриценко В.А., Егорихин В.Д. Придонная циркуляция в Гданьской впадине Балтийского моря: донные осадки и динамика затоков североморских вод // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 1–14.
- Емельянов Е.М., Пустельников О.С. Взвешенное вещество, его состав и баланс осадочного материала в водах Балтийского моря // Геология Балтийского моря. Вильнюс: Мокслас, 1976. С. 159–186.
- Емельянов Е.М., Стрюк В.Л. Водная взвесь // Осадкообразование в Балтийском море / Под ред. А.П. Лисицына, Е.М. Емельянова. М.: Наука, 1981. С. 79–106.
- Емельянов Е.М., Стрюк В.Л., Тримонис Э.С. Распределение взвеси в Гданьском бассейне // Геохимия осадочного процесса в Балтийском море / Ред. Е.М. Емельянов, В.Н. Лукашин. М.: Наука, 1986. С. 45–57.
- Кречик В.А., Капустина М.В., Дубравин В.Ф., Ежова Е.Е., Лукашин В.Н. Изменчивость термохалинных и гидрохимических, седиментационных и биологических показателей придонных вод Гданьской и Готландской впадин в 2015–2016 годах // Система Балтийского моря / Ред. Лисицын А.П. и др. М.: Научный мир, 2017. С. 109–121.

- Кудрявцева Е.А.* Первичная продукция фитопланктона // Система Балтийского моря / Ред. Лисицын А.П. и др. М.: Научный мир, 2017. С. 214–241.
- Ланге Е.К.* Фитопланктон южной части Балтийского моря // Система Балтийского моря / Ред. Лисицын А.П. и др. М.: Научный мир, 2017. С. 241–257.
- Ронов А.Б., Ярошевский А.А.* Химическое строение земной коры // Геохимия. 1967. № 11. С. 1285–1309.
- Сивков В.В.* Водная взвесь // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Море. Калининград: Терра Балтика, 2012. С. 12–127.
- Сивков В.В., Емельянов Е.М., Бубнова Е.С.* Концентрация и гранулометрический состав взвеси // Система Балтийского моря / Ред. Лисицын А.П. и др. М.: Научный мир, 2017. С. 292–316.
- Сивков В.В., Журов Ю.И.* О специфике скоплений взвеси во впадинах Балтийского моря // Океанология. 1991. Т. 31. № 6. С. 1060–1066.
- Тамбиев С.Б., Гордеев В.В., Серых В.Я., Серова В.В.* Взвешенное вещество на профиле от устья р. Даугавы через Рижский залив // Геологическая история и геохимия Балтийского моря / Ред. А.П. Лисицын. М.: Наука, 1984. С. 4–18.
- Bagaev A., Mazyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., Chubarenko I.* Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion // Science of the total environments. 2017. Vol. 599–600. P. 560–571.
- Bauer S., Blomqvist S., Ingry J.* Distribution of dissolved and suspended particulate molybdenum, vanadium and tungsten in the Baltic Sea // Marine chemistry. 2017. Vol. 196. P. 135–147.
- Bernard P.C., Van Grieken R., Brugmann L.* Geochemistry of suspended matter from the Baltic Sea. 1. Results of the individual particle characterization by Automated electron microprobe // Marine chemistry. 1989. Vol. 26. P. 155–177.
- Bostrom K., Burman J.-O., Pointer C., Ingri J.* Selective removal of trace elements from the Baltic by suspended matter // Marine chemistry. 1981. Vol. 10. P. 335–354.
- Boström K., Ingri J.* Origin of iron-manganese-rich suspended matter in the Landsort Deep, NW Baltic Sea // Marine Chemistry. 1988. Vol. 24. No. 1. P. 93–98.
- Brzezinska A., Trzosinska A., Zmijewska W., Wodkiewicz L.* Trace metal in suspended matter and surficial bottom sediments from the southern Baltic // Oceanologia. 1984. Vol. 18. P. 59–77.
- Brugmann L., Bernard P.C., van Grieken R.* Geochemistry of suspended matter from the Baltic Sea. 2. Results of bulk trace metal analysis by AAS // Marine chemistry. 1992. Vol. 38. P. 303–323.
- Bulczak A.I., Rak D., Schmidt D., Beldowski J.* Observation of near-bottom currents in Bornholm Basin, Slupsk Furrow and Gdansk Deep // Deep-Sea Res. II: topical studies in oceanography. 2016. Vol. 128. P. 96–113.
- Dellwig O., Leipe T., März C., Glockzin M., Pollehne F., Schnetger B., Yakushev E.V., Böttcher M.E., Brumsack H.-J.* A new particulate Mn-Fe-P shuttle at the redoxcline of anoxic basins // Geochim. Cosmochim. Acta. 2010. Vol. 74. P. 7100–7115.
- Falkowska L., Beldowska M.* 5.1. Deposition of chemical substance from the atmosphere // Geochemistry of Baltic Sea surface sediments / Sci. ed. S. Uscinowicz. Warsaw: Polish geological institute, 2011. P. 83–93.
- Geochemistry of Baltic Sea surface sediments / Sci. ed. S. Uscinowicz. Warsaw: Polish geological institute–National research institute, 2011. 356 p.
- Glockzin M., Pollehne F., Dellwig O.* Stationary sinking velocity of authigenic manganese oxides at pelagic redox clines // Mar. Chem. 2014. Vol. 160. P. 67–74.
- González-Fernández B., Rodríguez-Valdés E., Boente C., Menéndez-Casares E., Fernández-Braña A., Gallego J.R.* Long-term ongoing impact of arsenic contamination on the

- environmental compartments of a former mining-metallurgy area // *Science of the total environments*. 2018. Vol. 610–611. P. 820–830.
- Ingri J., Lofvendahl R., Bostrom K.* Chemistry of suspended particles in the southern Baltic Sea // *Marine chemistry*. 1991. Vol. 32. P. 73–87.
- Jedrach A., Kwasigroch U., Beldowska M., Kuliński K.* Mercury in suspended matter of the gulf of Gdańsk: origin, distribution and transport at the land-sea interface // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 118. P. 354–367.
- Li L., Pohl C., Ren J.-L., Schulz-Bull D., Cao X.-H., Nausch G., Zhang J.* Revisiting the biogeochemistry of arsenic in the Baltic Sea: Impact of anthropogenic activity // *Science of the total environments*. 2018. Vol. 613–614. P. 557–568.
- Neretin L.M., Pohl C., Jost G., Leipe T., Pollehne F.* Manganese cycling in the Gotland Deep, Baltic Sea // *Mar. Chem.* 2003. Vol. 82. P. 125–143.
- Pohl C., Fernández-Otero E.* Iron distribution and speciation in oxic and anoxic waters of the Baltic Sea // *Mar. Chem.* 2012. Vol. 145–147. P. 1–15.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of continental crust // *Treatise on Geochemistry* / H.D. Holland, K.K. Turekian - eds. Vol. 3. The Crust. Amsterdam, Boston et oth.: Elsevier Pergamon, 2003. P. 1–64.
- Szefer P.* Metals, metalloids and radionuclides in the Baltic Sea ecosystem // *Trace metals in the environment*. Vol. 5. Elsevier science B.V. Amsterdam, 2002. 752 p.
- Szefer P., Grembecka M.* Chemometric assessment of chemical element distribution in bottom sediments of the Southern Baltic Sea including Vistula and Szczecin lagoons – an overview // *Polish J. of Environ. Stud.* 2009. Vol. 18. No. 1. P. 25–34.
- Walve J., Gelting J., Ingry J.* Trace metals and nutrients in Baltic Sea cyanobacteria: internal and external fractions and potential use in nitrogen fixation // *Mar. Chem.* 2014. Vol. 158. P. 27–37.
- Yakushev E.V., Pollehne F., Jost G., Kuznetsov I., Schneider B., Umlauf L.* Analysis of the water column oxic/anoxic interface in the Black and Baltic Seas with a numerical model // *Mar. Chem.* 2007. Vol. 107. P. 388–410.

## SUSPENDED MATTER IN THE BALTIC SEA: DISTRIBUTION AND CHEMICAL COMPOSITION

**V.N. Lukashin, V.A. Krechik, E.S. Bubnova, D.P. Starodymova, A.A. Klyuvitkin**

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

Submitted 02.07.2018, accepted 18.09.2018

New data are presented on chemical composition of dispersed sedimentary matter in the Baltic Sea. The suspended matter-forming components are considered – biogenic opal, organic matter, and lithogenic substance, as well as the Fe, Mn and trace elements. Seasonal variability in the distribution of these components in the water column from surface to bottom is established. Chemical composition study has revealed enrichment of suspended matter by number of trace elements in the whole water column that is explained by both man-made pollution, and natural processes in water (organic matter degradation, formation hydrogenic forms of Fe and Mn, adsorption on natural sorbents). Matrix correlation analysis of concentrations of chemical elements revealed relationship between the elements.

**Keywords:** suspended matter, chemical composition, suspended matter-forming components, trace elements, nepheloid layer, technogenic pollution

### References

- Bagaev A., Mizyuk A., Khatmullina L., Isachenko I., and Chubarenko I. Anthropogenic fibres in the Baltic Sea water column: Field data, laboratory and numerical testing of their motion. *Science of the total environments*, 2017, Vol. 599–600, pp. 560–571.
- Bauer S., Blomqvist S., and Ingry J. Distribution of dissolved and suspended particulate molybdenum, vanadium and tungsten in the Baltic Sea. *Marine chemistry*, 2017, Vol. 196, pp. 135–147.
- Bernard P.C., Van Grieken R., and Brugmann L. Geochemistry of suspended matter from the Baltic Sea.: Results of the individual particle characterization by Automated electron microprobe. *Marine chemistry*, 1989, Vol. 26, pp. 155–177.
- Bostrom K., Burman J.-O., Pointer C., and Ingry J. Selective removal of trace elements from the Baltic by suspended matter. *Marine chemistry*, 1981, Vol. 10, pp. 335–354.
- Boström K. and Ingry J. Origin of iron-manganese-rich suspended matter in the Landsort Deep, NW Baltic Sea. *Marine Chemistry*, 1988, Vol. 24, No. 1, pp. 93–98.
- Brzezinska A., Trzosinska A., Zmijewska W., and Wodkiewicz L. Trace metal in suspended matter and surficial bottom sediments from the southern Baltic. *Oceanologia*, 1984, Vol. 18, pp. 59–77.
- Brugmann L, Bernard P.C., and van Grieken R. Geochemistry of suspended matter from the Baltic Sea: Results of bulk trace metal analysis by AAS. *Marine chemistry*, 1992, Vol. 38, pp. 303–323.
- Bulczak A.I., Rak D., Schmidt D., and Beldowski J. Observation of near-bottom currents in Bornholm Basin, Slupsk Furrow and Gdansk Deep. *Deep-Sea Res., II: topical studies in oceanography*, 2016, Vol. 128, pp. 96–113.
- Demina L.L. Formy migratsii tyazhelykh metallov v okeane (Forms of heavy metals migration in the ocean). Moscow: Nauka, 1982, 120 p.
- Demina L.L. Formy nakhozheniya nekotorykh tyazhelykh metallov v vodakh Baltiiskogo morya (Occurrence forms of some heavy metals in the waters of the Baltic sea). *Geologicheskaya istoriya i geokhimiya Baltiiskogo morya (Geological history and geochemistry of the Baltic Sea)*, Ed. A.P. Lisitsyn, Moscow: Nauka, 1984, pp. 55–64.
- Dellwig O., Leipe T., März C., Glockzin M., Pollehne F., Schnetger B., Yakushev E.V., Böttcher M.E., and Brumsack H.-J. A new particulate Mn-Fe-P shuttle at the redoxcline of anoxic basins. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2010, Vol. 74, pp. 7100–7115.
- Emel'yanov E.M. Kolichestvennoe raspredelenie morskoi vzvesi u poberezh'ya Sambiiskogo poluostrova Kurshskoi kosy (Baltiiskoe more) (Quantitative distribution of marine suspended matter off the coast of the Sambian Peninsula of the Curonian spit (Baltic sea), *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1968, No. 18, pp. 203–213.
- Emel'yanov E.M. Raspredelenie elementov (Fe, Al, Ti, Mn, Cu, Ni, Co) vo vzvesi Baltiiskogo morya (Distribution of elements (Fe, Al, Ti, Mn, Cu, Ni, Co) in suspended matter of the Baltic Sea). *Voprosy chetvertichnoi geologii Pribaltiki (Questions of Quaternary Geology of the Baltic States)*, Riga: Zinatne, 1974, No. 7, pp. 81–99.
- Emel'yanov E.M. Zhelezomargantsevyi rudnyi protsess v Baltiiskom more (Iron-manganese ore processes in the Baltic sea). *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 2011, No. 3, pp. 227–248.
- Emel'yanov E.M. Donnye osadki: raspredelenie, granulometriya, mineralogiya, geokhimiya (Bottom sediments: distribution, granulometry, mineralogy, geochemistry. Sistema

- Baltiiskogo morya (The Baltic Sea system), Moscow: Scientific World, 2017, pp. 380–474.
- Emel'yanov E.M., Gritsenko V.A., and Egorikhin V.D.* Pridonnaya tsirkulyatsiya v Gdan'skoi vpadine Baltiiskogo morya: donnye osadki i dinamika zatokov severomorskikh vod (Bottom circulation in the Gdansk basin of the Baltic sea: bottom sediments and the dynamics of the North sea water flows. *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 1, pp. 1–14.
- Emel'yanov E.M. and Pustel'nikov O.S.* Vzveshennoe veshchestvo, ego sostav i balans osadochnogo materiala v vodakh Baltiiskogo moray (Suspended matter, its composition and the balance of sedimentary material in the waters of the Baltic Sea). *Geologi Baltiiskogo moray (Geology of the Baltic Sea)*, Vilnius: Mokslas, 1976, pp. 159–186.
- Emel'yanov E.M. and Stryuk V.L.* Vodnaya vzves' (Water suspended matter). *Osadkoobrazovanie v Baltiiskom more (Sedimentation in the Baltic sea)*, Eds. A.P. Lisitsyn, E.M. Emel'yanov, Moscow: Nauka, 1981, pp. 79–106.
- Emel'yanov E.M., Stryuk V.L., and Trimonis E.S.* Raspredelenie vzvesi v Gdan'skom basseine (Distribution of suspended matter in the Gdansk basin). *Geokhimiya osadochnogo protsessa v Baltiiskom more (Geochemistry of sedimentation process in the Baltic Sea)*, Eds. E.M. Emel'yanov, V.N. Lukashin, Moscow: Nauka, 1986, pp. 45–57.
- Falkowska L. and Beldowska M.* Deposition of chemical substance from the atmosphere. *Geochemistry of Baltic Sea surface sediments*, Sci. ed. S. Uscinowicz, Warsaw: Polish geological institute, 2011, pp. 83–93.
- Geochemistry of Baltic Sea surface sediments*. Sci. ed. S. Uscinowicz, Warsaw: Polish geological institute–National research institute, 2011, 356 p.
- Glockzin M., Pollehne F., and Dellwig O.* Stationary sinking velocity of authigenic manganese oxides at pelagic redox clines. *Mar. Chem.*, 2014, Vol. 160, pp. 67–74.
- González-Fernández B., Rodríguez-Valdés E., Boente C., Menéndez-Casares E., Fernández-Braña A., and Gallego J.R.* Long-term ongoing impact of arsenic contamination on the environmental compartments of a former mining-metallurgy area. *Science of the total environments*, 2018, Vol. 610–611, pp. 820–830.
- Ingri J., Lofvendahl R., and Bostrom K.* Chemistry of suspended particles in the southern Baltic Sea. *Marine chemistry*, 1991, Vol. 32, pp. 73–87.
- Jedrach A., Kwasigroch U., Beldowska M., and Kuliński K.* Mercury in suspended matter of the gulf of Gdańsk: origin, distribution and transport at the land-sea interface. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, Vol. 118, pp. 354–367.
- Krechik V.A., Kapustina M.V., Dubravin V.F., Ezhova E.E., and Lukashin V.N.* Izmenchivost' termokhalinnykh i gidrokhimicheskikh, sedimentatsionnykh i biologicheskikh pokazatelei pridonnykh vod Gdan'skoi i Gotlandskoi vpadin v 2015–2016 godakh (Variability of thermohaline and hydrochemical, sedimentation and biological parameters of the bottom waters of the Gdansk and Gotland basins in 2015–2016). *Sistema Baltiiskogo morya (The Baltic Sea system)*, Eds. A.P. Lisitsyn et al., Moscow: Scientific World, 2017, pp. 109–121.
- Kudryavtseva E.A.* Pervichnaya produktsiya fitoplanktona (Primary production of phytoplankton). *Sistema Baltiiskogo morya (The Baltic Sea system)*, Eds. A.P. Lisitsyn et al. Moscow: Scientific World, 2017, pp. 214–241.
- Lange E.K.* Fitoplankton yuzhnoi chasti Baltiiskogo morya (Phytoplankton of the southern Baltic Sea). *Sistema Baltiiskogo morya (The Baltic Sea system)*, Eds. A.P. Lisitsyn et al., Moscow: Scientific World, 2017, pp. 241–257.
- Li L., Pohl C., Ren J.-L., Schulz-Bull D., Cao X.-H., Nausch G., and Zhang J.* Revisiting the biogeochemistry of arsenic in the Baltic Sea: Impact of anthropogenic activity. *Science of the total environments*, 2018, Vol. 613–614, pp. 557–568.

- Neretin L.M., Pohl C., Jost G., Leipe T., and Pollehne F.* Manganese cycling in the Gotland Deep, Baltic Sea. *Mar. Chem.*, 2003, Vol. 82, pp. 125–143.
- Pohl C. and Fernàndes-Otero E.* Iron distribution and speciation in oxic and anoxic waters of the Baltic Sea. *Mar. Chem.*, 2012, Vol. 145–147, pp. 1–15.
- Ronov A.B. and Yaroshevskii A.A.* Khimicheskoe stroenie zemnoi kory (Chemical structure of the earth's crust). *Geokhimiya*, 1967, No. 11, pp. 1285–1309.
- Rudnick R.L. and Gao S.* Composition of continental crust. *Treatise on Geochemistry*, Vol. 3, The Crust, Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian, Amsterdam, Boston et oth.: Elsevier Pergamon, 2003, pp. 1–64.
- Sivkov V.V.* Vodnaya vzves' (Water suspended matter). *Neft' i okruzhayushchaya sreda Kaliningradskoi oblasti (Oil and the environment of the Kaliningrad region)*, Vol. II, More (SEA), Kaliningrad: Terra Baltika, 2012, pp. 12–127.
- Sivkov V.V., Emel'yanov E.M., and Bubnova E.S.* Kонтсentratsiya i granulometricheskii sostav vzvesi (Concentration and particle size distribution of the suspended matter). *Sistema Baltiiskogo morya (The Baltic Sea system)*, Eds. A.P. Lisitsyn et al., Moscow: Scientific World, 2017, pp. 292–316.
- Sivkov V.V. and Zhurov Yu.I.* O spetsifike skoplenii vzvesi vo vpadinakh Baltiiskogo morya (On the specifics of suspended matter accumulations in the Baltic Sea deeps). *Okeanologiya*, 1991, Vol. 31, No. 6, pp. 1060–1066.
- Tambiev S.B., Gordeev V.V., Serykh V.Ya., and Serova V.V.* Vzveshennoe veshchestvo na profile ot ust'ya r. Daugavy cherez Rizhskii zaliv (Suspended matter on the profile of the mouth of the river Daugava through the Gulf of Riga). *Geologicheskaya istoriya i geokhimiya Baltiiskogo moraya (Geological history and Geochemistry of the Baltic Sea)*, Ed. A.P. Lisitsyn, Moscow: Nauka, 1984, pp. 4–18.
- Szefer P.* Metals, metalloids and radionuclides in the Baltic Sea ecosystem. Trace metals in the environment, Vol. 5, Amsterdam: Elsevier science B.V., 2002, 752 p.
- Szefer P. and Grembecka M.* Chemometric assessment of chemical element distribution in bottom sediments of the Southern Baltic Sea including Vistula and Szczecin lagoons an overview. *Polish J. of Environ. Stud.*, 2009, Vol. 18, No. 1, pp. 25–34.
- Walve J., Gelting J., and Ingry J.* Trace metals and nutrients in Baltic Sea cyanobacteria: internal and external fractions and potential use in nitrogen fixation. *Mar. Chem.*, 2014, Vol. 158, pp. 27–37.
- Yakushev E.V., Pollehne F., Jost G., Kuznetsov I., Schneider B., and Umlauf L.* Analysis of the water column oxic/anoxic interface in the Black and Baltic Seas with a numerical model. *Mar. Chem.*, 2007, Vol. 107, pp. 388–410.

## СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ, ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА И АБСОЛЮТНЫЕ МАССЫ ОСАДКОВ В ШЕЛЬФОВОЙ ОБЛАСТИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

А.Н. Новигатский, А.А. Ключевиткин, А.П. Лисицын

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [novigatsky@ocean.ru](mailto:novigatsky@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 22.06.2018, одобрена к печати 10.09.2018

Применен новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод, полученного с помощью седиментационных ловушек (вертикальный поток осадочного вещества), в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков (абсолютные массы). Это открывает возможность *in situ* (по потокам осадочного вещества в толще вод) изучать современную седиментацию в поверхностных слоях осадков. И на современном технологическом уровне понимать связь осадочных процессов с природной средой и климатом. Открывается возможность и для решения обратной задачи – по скоростям (или абсолютным массам) осадков восстанавливать потоки вещества и химических элементов в морях геологического прошлого.

**Ключевые слова:** вертикальные потоки осадочного вещества, скорости осадконакопления, Северный Ледовитый океан, арктический шельф

### Введение

Для осадочного процесса в Арктике характерен особый тип седиментогенеза – ледовый морской, который соответствует для суши континентальному седиментогенезу зон холодных полярных пустынь, северной тундры и тайги. Здесь господствуют терригенные осадки, специфичные по способам подготовки осадочного вещества, его транспортировки и отложения. Особенно большую роль для всей зоны играют существование воды в водосборе и на поверхности моря большую часть года в твердом виде (снег, лед), многолетняя мерзлота на шельфе и водосборе, а также минимальное значение биогенных процессов. Верхний деятельный слой моря, где идут процессы фотосинтеза, подготовки первопищи для всех организмов, большую часть года или круглогодично (области паковых льдов) перекрыт припайными и дрейфующими льдами, а также снегом, блокирующим фотосинтез. Длительная полярная ночь и малое поступление биогенных элементов с речным стоком в сочетании с самыми низкими температурами для Северного полушария – все это важнейшие факторы природной среды Арктики, они и определяют ход осадочного процесса (Lisitzin, 2002, 2010).

Северный Ледовитый океан является океаническим бассейном с сильно выраженной сезонностью осадконакопления, такие параметры, как площадь развития морских льдов, твердый сток рек, абразия берегов, первичная продукция, температуры поверхностной водной массы и приземного слоя атмосферы, демонстрируют

ярко выраженную зональность и сезонность в течение года (Levitan et al., 2012).

От зимнего сезона к летнему (от полярной ночи к полярному дню) резко меняется не только освещенность и тепло, но и площадь распространения морских льдов, их толщина и сплоченность. Ледовитость максимальна в апреле–мае и минимальна в августе, соответственно, площадь развития морских льдов в Северном полушарии меняется от 15,1 млн. км<sup>2</sup> зимой до 8,4 млн. км<sup>2</sup> летом, т.е. почти в два раза, с минимально известными площадями летом в начале XXI века (Ivanov et al., 2016).

Столь же резко выражена сезонность в годовой истории твердого речного стока. В паводок реки сбрасывают порядка 45–65% взвеси от годового выноса (иногда – до 70%). На реках Западной Арктики это происходит в мае, а Восточной – в июне (Gordeev, 2006).

Очевидно, что максимальная интенсивность абразии берегов тоже приходится на летний сезон, когда прибрежные воды свободны от однолетних морских, припайных и речных льдов. В это же время все упомянутые типы льдов летом тают, освобождая заключенный в них осадочный материал для поступления в водную толщу и далее – в донные осадки. Все эти причины способствуют максимальному поступлению осадочного вещества в бассейн Северного Ледовитого океана именно в летний сезон (Lisitzin, 2002).

Среди основных видов зональности осадконакопления, известных в океанических бассейнах (циркумконтинентальной, широтной, вертикальной и тектоно-магматической), в Северном Ледовитом океане особенно четко выражена циркумконтинентальная зональность. В зонах смешения речной и морской воды идет лавинная седиментация и изменение состава речной взвеси (явление маргинального фильтра). Это область внутреннего шельфа, именно здесь происходит локализация огромных количеств речной взвеси (здесь задерживается до 93% речной взвеси) (Lisitzin, 2004). Массы рыхлого осадочного материала в береговой зоне при абразии (в том числе – термоабразии) берегов также в основном остаются в пределах внутреннего шельфа, не проникая далее в пелагическую область (Grigoriev et al., 2004). Это подтверждается и прямыми исследованиями морской взвеси в Белом, Баренцевом и Карском морях (Lisitzin et al., 1994; Shevchenko et al., 1998; Gaye et al., 2007; Politova et al., 2012; Lein et al., 2012).

### **Материалы и методы**

Используя высокоразрешающие методы в рамках программы ИО РАН «Система Белого моря» впервые очень подробно, в отличие от других морей, в Белом море в течение пятнадцати лет проводились непрерывные прямые исследования осадочных процессов не только в донных осадках, но и в толще вод посредством мембранной ультрафильтрации взвеси, а также с помощью глубинных автоматических седиментационных обсерваторий (АГОС) (Lisitzin et al., 2014). Это дает представление о ежемесячных (и более длительных) прямых количественных определениях вертикальных потоков с непрерывным отбором вещества с разных

глубин круглый год, что позволяет получить прямые данные в пространстве по глубине и во времени о концентрации (мг/л), скорости осаждения (мм/год) и вертикальных потоках (г/м<sup>2</sup>/год), т.е. абсолютных массах осадочного вещества в толще вод и верхнем слое донных осадков (на границе вода – осадок) и его изменений в ходе осаждения.

Для определения скорости современного осадконакопления в Белом море верхний слой осадков (0–20 см) отбирался мультикорером, или трубкой Неймиста, т.е. без нарушения поверхностного слоя. Определение скоростей проводилось параллельно несколькими методами: с помощью радионуклидного анализа (<sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Pb) (Aliev et al., 2007), а также методами лито- и биостратиграфии (Polyakova et al., 2014). Величины придонных вертикальных потоков осадочного вещества определялись прямым измерением седиментационными ловушками в составе автоматических обсерваторий АГОС (Lisitzin et al., 2015) (рис. 1).

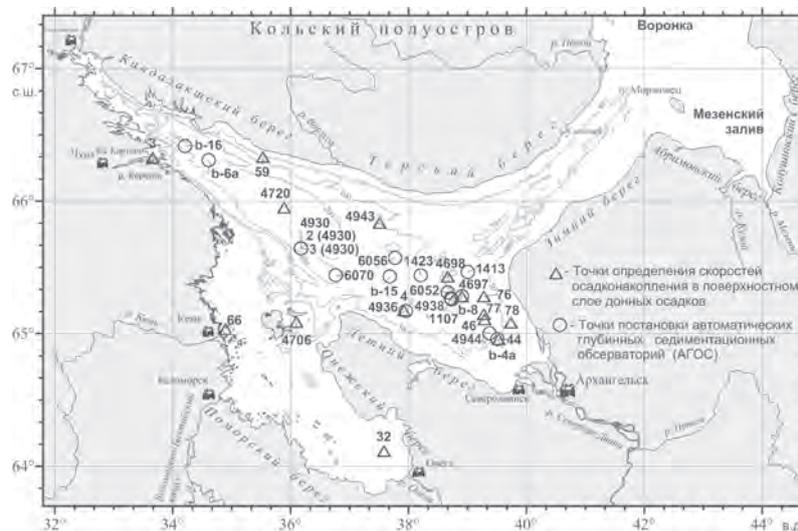


Рис. 1. Расположение в Белом море обсерваторий АГОС годовой экспозиции и точки определения потоков (абсолютных масс) в поверхностном слое донных осадков (скорости седиментации по <sup>210</sup>Pb и <sup>137</sup>Cs пересчитаны в абсолютные массы)

### Скорости осадконакопления в Северном Ледовитом океане

В значениях скоростей седиментации в Северном Ледовитом океане отмечается огромная пестрота, особенно на континентальных окраинах. Установлен разброс значений порядка от 500 см/тыс. лет в маргинальных фильтрах (депоцентрах зон смешения) и некоторых фьордах до нулевых и даже отрицательных значений (в зонах донной эрозии), например, на приподнятых участках дна Баренцева и Карского морей. Если двигаться в пелагическом направлении, то можно уловить тенденцию общего резкого падения средней скорости седиментации от сотен и десятков сантиметров в тысячу лет на континентальных окраинах до первых сантиметров в тысячу лет (а иногда и менее) в глубоководных котловинах и на подводных хребтах и поднятиях (Lisitzin, 2002; Levitan et al., 2012).

В настоящее время существуют пока только фрагментарные сведения по скоростям осадконакопления в Северном Ледовитом океане (табл. 1). Выделяются мелководная и глубоководная зоны, отличающиеся по скоростям, составу и строению донных отложений. Мелководная (шельфовая) зона включает участки с глубинами менее 100 м и отличается преимущественно активной гидродинамикой. Для этой зоны характерно в недавней истории неоднократное осушение (снижение уровня на 100–120 м) полностью или частично, т.е. неоднократное изменение условий осадкообразования.

Таблица 1. Скорости осадконакопления в Северном Ледовитом океане, см в 1000 лет

Район	Скорость осадконакопления, см в 1000 лет	Источник
Хребет Ломоносова	0,1-0,3	Morris et al., 1985
Центральная Арктика	0,2	Sellen et al., 2009
Хребет Менделеева	0,15	Not et al., 2010
Хребет Менделеева	0,1-0,4	Gusev et al., 2012
Моря Российской Арктики	1-300	Куликов и др., 1970
Моря Российской Арктики	1-112	Levitan et al., 2012
Чукотское море	10-50	Pavlidis et al., 1996
Баренцево море	20-115	Ivanova et al., 2002
Белое море (губа Чупа)	30-100	Mityaev et al., 2012
Белое море	30-400	Aliev et al., 2007

Глубоководная зона (пелагиаль) занимает участки, расположенные на глубинах более 100 м. Для нее характерны слабая гидродинамическая активность и устойчивая аккумуляция осадков в течение почти всего позднечетвертичного времени, в том числе и в наиболее глубоководных ее участках – желобах и впадинах. Изменения условий осадкообразования были здесь сравнительно незначительными.

Рассматривая скорости накопления осадков, необходимо иметь в виду различия условий накопления их на разных участках морей, зависящие от удаленности области сноса, от рельефа дна и гидрологического режима морей. Вместе с тем необходимо учитывать, что условия накопления осадков были неоднозначными и на разных этапах осадконакопления на одних и тех же участках моря. Поэтому приходится говорить лишь об осредненных скоростях накопления осадков на определенных участках на том или ином временном этапе.

Литературный анализ позволяет дать следующую оценку осредненных скоростей накопления осадков в морях Российской Арктики. Так, в глубоководной зоне (>100 м) скорости накопления осадков в голоцене составляют в юго-западной части Карского моря 30–50 см в 1000 лет, а местами и более 50 см, то есть на порядок и более превышают скорости осадкообразования в пелагиали (1–10 мм/1000 лет или

0,1–1 см/1000 лет). В южной части желоба Воронина скорость осадконакопления превышает 50 см в 1000 лет, в средней части уменьшается до 20 см в 1000 лет, а в самой северной части желоба – до 10 см в 1000 лет. В то же время в средней и северной частях желоба Св. Анны скорости накопления голоценовых осадков колеблются от 3 до 8 см в 1000 лет (рис. 2) (Куликов и др., 1970).

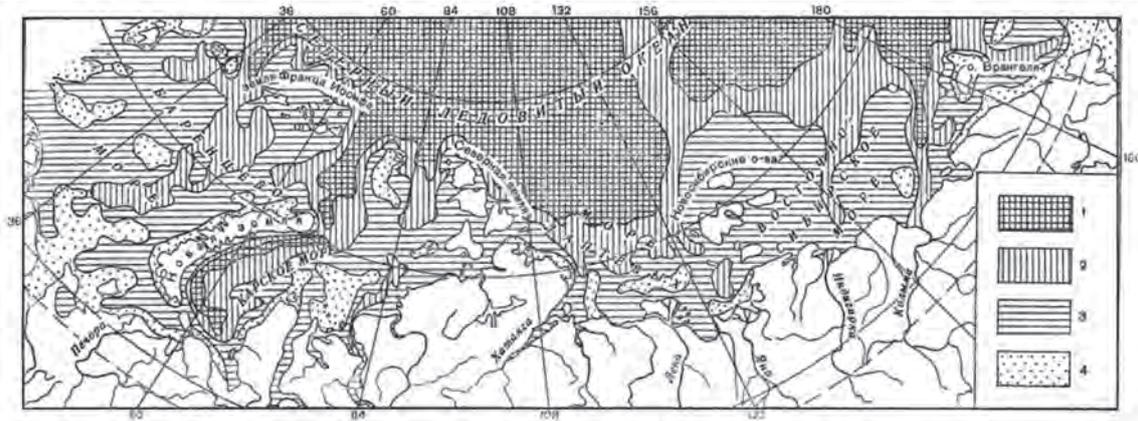


Рис. 2. Схематическая карта зон осадконакопления в морях российской Арктики. 1 – зона устойчивой аккумуляции глинистых осадков. Скорость осадконакопления от 1–2 см до 10–30 см в 1000 лет; 2 – зона устойчивой аккумуляции осадков разной зернистости. Скорость осадконакопления 50–300 см в 1000 лет; 3 – зона преимущественной аккумуляции осадков разной зернистости. Скорость осадконакопления 5–50 см в 1000 лет; 4 – зона преимущественного размыва донных отложений. Скорость осадконакопления 0–5 см в 1000 лет (Куликов и др., 1970)

Для глубоководной зоны морей Лаптевых и Чукотского пока имеется очень мало данных о скоростях осадконакопления. В глубоководной зоне Чукотского моря средние скорости накопления голоценовых отложений превышают 15 см в 1000 лет. Осредненные скорости накопления в северной части желоба Св. Анны составляют 3–4 см в 1000 лет. В центральной части Новоземельской впадины скорость осадконакопления превышает 10 см в 1000 лет (Куликов и др., 1970).

Мелководная зона арктических морей характеризуется сравнительно слабым накоплением голоценовых осадков, что связано, в том числе, с осушкой при оледенениях. Вместе с тем в пределах этой зоны имеются существенные различия в осадконакоплении на отдельных ее участках, обусловленные различиями рельефа дна и динамичности вод. Понижения дна и участки, расположенные на путях разноса тонкодисперсного осадочного материала, выносящегося в море речными водами, являются местами преобладающей аккумуляции голоценовых осадков. В то же время для более мелководных участков, находящихся в зоне активного волнового воздействия, а также для крутых склонов и участков, подверженных влиянию сильных приливно-отливных течений, характерно преобладание выноса алеврито-глинистой части осадочного материала и потому незначительная аккумуляция голоценовых осадков. Осадконакопление на этих участках происходит эпизодически и, в основном, тонкие осадки смываются течениями.

Осредненные скорости накопления голоценовых отложений в пределах мелководной зоны колеблются от нескольких миллиметров до 12–15 см в 1000 лет на участках, где вскрыты верхнеплейстоценовые отложения, до 100 см и более в 1000 лет в понижениях дна. Для мелководной зоны Баренцева моря характерна замедленная седиментация, и только в редких случаях скорость накопления голоценовых осадков измеряется величиной 4–8 мм в тысячелетие. Довольно часто встречаются зоны размыва, где обнажаются подстилающие отложения разного возраста и происхождения (Куликов и др., 1970).

Для морей Российской Арктики составлена схема зон осадконакопления в арктических морях, где выделены четыре зоны, характеризующиеся различным режимом осадконакопления: устойчивой аккумуляции глинистых осадков, устойчивой аккумуляции осадков разной зернистости, преимущественной аккумуляции осадков разной зернистости и преимущественного размыва (рис. 2) (Куликов и др., 1970; Levitan et al., 2012).

Таким образом, скорости седиментации в донных осадках Мирового океана меняются в широких пределах от менее 1 мм/год до 1000 мм/год и более (Лисицын, 1991). На континентальных окраинах Северного Ледовитого океана (СЛО) встречаются значения порядка 10 мм/год (в депоцентрах зон смещения речных и морских вод, проливе Фрама и некоторых фьордах), не редки также нулевые и даже отрицательные значения в зонах донной эрозии (участки дна Белого, Баренцева, Карского и др. морей) при средней скорости осадконакопления в пелагиали СЛО 0,01 мм/год, т.е. 10 мм/1000 лет (Stein, 2008).

#### **Сопоставление вертикальных потоков рассеянного осадочного вещества (взвеси) из водной толщи и абсолютных масс донных осадков**

Подробные исследования потоков осадочного материала седиментационными ловушками проводились на месте гибели атомной подводной лодки «Комсомолец» в Норвежском море В.Н. Лукашиным на протяжении 5 лет (Lukashin, 2000). На границе с Баренцевым морем на континентальном склоне о. Медвежий были определены вертикальные потоки равные 17,9 мг/м<sup>2</sup>/сут. на горизонте 133 м и 517 мг/м<sup>2</sup>/сут. на горизонте 268 м (глубина моря 283 м). При этом состав материала в ловушках отличается: в верхней ловушке присутствовали пеллеты, органический детрит, редкий терригенный материал, а в ловушке, поставленной в придонном нефелоидном слое, значительную часть составляет хлопьевидный и другой детрит с терригенными частицами с более редкими пеллетами.

На севере архипелага Новая Земля (бухта Русская Гавань) (76°16.0' с.ш., 62°27.1' в.д., гл. 104 м), поток осадочного вещества резко возрастает по мере увеличения глубины с 346 мг/м<sup>2</sup>/сут. на горизонте 70 м до 7660 мг/м<sup>2</sup>/сут. на горизонте 85 м (в 19 м от дна) (Politova et al., 2012). Вещество ловушек – агрегаты детрита, состоявшие почти наполовину из гидрослюды, пеллет, минеральных частиц алевритовой и мелкой песчаной фракций (главным образом, кварц, плагиоклаз, эпидот,

полевые шпаты). Это объясняется привносом обломочного материала течением, имеющим большую скорость и направленным со стороны берега с находящимся там ледником Шокальского.

Полученные нами значения по  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{137}\text{Cs}$  показывают скорости осадконакопления для всего Белого моря в интервале от 0,4 до 4,2 мм/год, в пересчете на абсолютные массы сухого осадка эти значения отвечают интервалу 93–1260 г/м<sup>2</sup>/год при среднем около 310 г/м<sup>2</sup>/год (табл. 2). Этому не противоречат данные о скоростях осадконакопления в прибрежных участках Кандалакшского залива Белого моря – 0,3–1,0 мм/год (70–233 г/м<sup>2</sup>/год) (Mityaev et al., 2012), в море Бофорта 1,4 мм/год (325 г/м<sup>2</sup>/год) (Bringue, 2012) и другие определения по Арктике (Stein, 2008).

Таблица 2. Оценка скорости осадконакопления в Белом море в верхнем слое осадка, метод радиохронологии (Aliev et al., 2007)

Станция	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Глубина, м	Скорость осадконакопления, мм/год	Абсолютные массы*, г/м <sup>2</sup> /год
4697	65°17'	38°55'	96	0,40	120
4698	65°25'	38°40'	107	0,79	237
4706	65°05'	36°06'	66	0,85	255
4720	65°57'	35°53'	290	2,2	660
32	64°07'	37°35'	16	2,7	810
78	65°05'	39°44'	32	4,2	1260
66	65°02'	34°53'	21	0,82	246
76	65°17'	39°16'	68	0,91	273
77	65°08'	39°17'	76	0,31	93
59	66°20'	35°32'	81	0,62	186
3	66°20'	33°40'	62	0,51	153
4943	65°50'	37°30'	116	0,69	207
44	64°58'	39°31'	54	2,6	780
46	65°06'	39°17'	73	1,1	330
4	65°10'	37°56'	88	1,7	510
Среднее геометрическое				1,0	310
Минимум				0,40	93
Максимум				4,2	1260

\*при средней плотности сухого осадка (0–20 см) 0,3 г/см<sup>3</sup>.

Прямые количественные данные по потокам осадочного вещества в придонных горизонтах Белого моря, полученные с помощью седиментационных ловушек на обсерваториях АГОС за 15 лет, дали значения в интервале 149–1814 г/м<sup>2</sup>/год при среднем – 335 г/м<sup>2</sup>/год (табл. 3).

Таблица 3. Придонные интегральные (годовые) потоки рассеянного осадочного вещества в Белом море

Станция	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Глубина, м	Горизонт, м	Величина придонного потока, г/м <sup>2</sup> /год
b-16	66°34'	33°47'	236	226	357
b-4a	64°57'	39°31'	50	30	752
b-8	64°35'	39°01'	96	85	330
b-15	65°26'	37°40'	132	125	276
b-15	65°26'	37°40'	132	127	354
b-6a	66°09'	35°03'	267	250	325
b-6a	66°09'	35°03'	267	255	421
6056	65°34'	37°45'	139	130	390
6062	65°05'	36°05'	70	60	1814
6070	65°26'	36°45'	229	220	639
4930	65°38'	36°10'	255	238	149
2 (4930)	65°38'	36°09'	249	207	317
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	185	195
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	195	208
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	205	282
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	215	378
4944	65°00'	39°22'	67	52	201
4938	65°15'	38°43'	117	72	219
4936	65°10'	37°57'	97	83	193
Среднее геометрическое					335
Минимум					149
Максимум					1814

Более низкие значения абсолютных масс верхнего слоя донных осадков в сравнении с придонными потоками (при их сравнении в сходных единицах) связаны с деструкцией органического вещества и всей биогенной триады во время нахождения вещества в самом верхнем слое (наилке), кроме того, дна достигает только 1/100 часть первичной продукции. Это подтверждается исследованиями по органическому веществу (Lein et al., 2013), где показано, что при длительном пребывании частиц в самом верхнем слое осадка продолжается потребление органического углерода бентосом и бактериями (выедание), а также частичное растворение других компонентов биогенной триады ( $\text{CaCO}_3$  и  $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ ).

Наиболее высокие значения скоростей осадконакопления (и потоков осадочного вещества) выявлены в маргинальных фильтрах, на границе река – море (р. Сев. Двина, Онега, Кемь), а также вдоль стокового течения р. Сев. Двина в Двинском заливе (Lisitzin et al., 2014; 2015). Кроме того, высокие скорости осадконакопления обнаружены в глубоководных участках Бассейна, Кандалакшского и Двинского

залива в областях депрессий дна (Кандалакшский грабен и др.), они частично связаны и со сложными склоновыми процессами (мутьевые потоки, гравититы и др.) на дне моря.

Линейная зависимость между вертикальными потоками осадочного вещества и абсолютными массами донных осадков показывает достаточно высокую статистическую значимость ( $R^2=0,8$ ;  $n=15$ ), а уравнение регрессии на графике позволяет впервые прогнозировать скорости осадконакопления и абсолютные массы по прямым данным вертикальных потоков осадочного вещества в придонном слое (Lisitzin et al., 2015). Более высокие значения придонных потоков осадочного вещества встречены на ст. 6062 (между о. Большой Соловецкий и о. Анзерский): они в разы превышают абсолютные массы в этой области. Этот район испытывает интенсивную гидродинамическую нагрузку (полусуточные приливные циклы Белого моря), что выражается в доминировании латерального вектора переноса осадочного вещества над обычным – вертикальным. Суммарный результирующий вектор скорости латерального движения придонных водных масс Белого моря в течение года в среднем составляет 1,5 см/с, т.е. не создает существенных препятствий для осаждения под действием силы тяжести (Lisitzin et al., 2014). Кроме того, на отдельных станциях выделяются участки быстрой и сверхбыстрой седиментации в устьевых (ст. b-4a) и склоновых (ст. 6070 и 3) областях (Лисицын, 1991).

### Заключение

Применен новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных обсерваториях в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. Такой подход открывает возможность *in situ* (по потокам осадочного вещества в толще вод) прогнозировать в первом приближении современную седиментацию в поверхностном слое донных осадков, на новом технологическом уровне проследить изменения природной среды и климата. Открывается возможность для решения обратной задачи – по скоростям (или абсолютным массам) осадков восстанавливать потоки вещества и химических элементов в морях геологического прошлого. Это тема будущих исследований.

Обработка и получение материала выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 14-27-00114-П. В рамках Государственного задания ИО РАН по теме № 0149-2018-0016 и Программы ПП РАН 49.1.2. (тема № 0149-2018-0031) осуществлялась интерпретация полученных данных.

### Литература

Куликов Н.Н., Лапина Н.Н., Семенов Ю.П., Белов Н.А., Спиридонов М.А. Стратификация и скорости накопления донных отложений Арктических морей СССР. Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое // Ленинград: Гидрометеоздат, 1970. С. 34–41.

- Лисицын А.П.* Процессы терригенной седиментации в морях и океанах / М.: Наука, 1991. 272 с.
- Aliev R., Bobrov V., Kalmykov S., Melgunov M., Vlasova I., Shevchenko V., Novigatsky A., Lisitzin A.* Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2007. Vol. 274(2). P. 315–321.
- Bringue A., Rochon A.* Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort sea, Canadian Arctic) // *Marine Geology*. 2012. Vol. 291–294. No. 3. P. 83–96.
- Gaye B., Fahl K., Kodina L. A., Lahajnar N., Nagel B., Unger D., Gebhardt A. C.* Particulate matter fluxes in the southern and central Kara Sea compared to sediments: Bulk fluxes, amino acids, stable carbon and nitrogen isotopes, sterols and fatty acids // *Continental Shelf Research*. 2007. Vol. 27(20). P. 2570–2594.
- Grigoriev M.N., Rachold V., Schirrmeister L., Hubberten H.W.* Organic carbon input to the Arctic Seas through coastal erosion. In *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Ed. R. Stein and R. Macdonald // Springer-Verlag Berlin. 2004. P. 41–45.
- Gordeev V.V.* Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // *Geomorphology*. 2006. Vol. 80(1–2). P. 94–104.
- Gusev E.A., Maksimov F.E., Novikhina E.S., Kuznetsov V.Yu., Levchenko S.B., Zherebtsov I.E., Baranova N.G.* On stratigraphy of bottom sediments from Mendeleev Rise (the Arctic Ocean) Region // *Vestnik Saint-Petersburg University*. 2012. Vol. 4. P. 102–115.
- Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N. V., Repina I., Sandø A. B., Smedsrud L. H., Smirnov A.* Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: A suggested positive feedback // *Journal of Physical Oceanography*. 2016. Vol. 46 (5). P. 1437–1456.
- Ivanova E.V., Murdmaa I.O., Duplessy J.C., Paterne M.* Late Weichselian to holocene paleoenvironments in the Barents Sea // *Global and Planetary Change*. 2002. Vol. 34(3–4). P. 209–218.
- Levitani M.A., Syromyatnikov K.V., Kuz'mina T.G.* Lithological and geochemical characteristics of recent and Quaternary sedimentation in the Arctic Ocean // *Geochemistry International*. 2012. Vol. 50 (7). P. 559–573.
- Lein A.Y., Kravchishina M.D., Politova N.V., Savvichev A.S., Veslopolova E.F., Mitskevich I.N., Ul'yanova N.V., Shevchenko V.P., Ivanov M.V.* Transformation of particulate organic matter at the water-bottom boundary in the Russian Arctic seas: Evidence from isotope and radioisotope data // *Lithology and Mineral Resources*. 2012. Vol. 47(2). P. 99–128.
- Lein A.Y., Makkaveev P.N., Savvichev A.S., Kravchishina M.D., Belyaev N.A., Dara O.M., Flint M.V.* Transformation of suspended particulate matter into sediment in the Kara Sea in September of 2011 // *Oceanology*. 2013. Vol. 53(5). P. 570–606.
- Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Vinogradov M.E., Severina O.V., Vavilova V.V., Mitzkevich I.N.* Particle fluxes in the Kara Sea and Ob and Yenisei estuaries // *Oceanology*. 1994. Vol. 34(5). P. 748–758.
- Lisitzin A.P.* Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: recent and past. Springer. 2002. 563 p.
- Lisitzin A.P.* Sediment fluxes, natural filtration, and sedimentary systems of a «living ocean» // *Russian Geology and Geophysics*. 2004. Vol. 45(1). P. 15–48.
- Lisitzin A.P.* Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. Vol. 51(1). P. 12–47.
- Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Filippov A.S., Politova N.V.* Dispersed organic matter and its fluxes in oceans and seas from the

- example of the White Sea: results of a 12-year study // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 456. No. 1. P. 635–639.
- Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Aliev R.A., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D.* Comparative study of vertical suspension fluxes from the water column, rates of sedimentation, and absolute masses of the bottom sediments in the White Sea basin of the Arctic Ocean // *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 465. No. 2. P. 1253–1256.
- Lukashin V.N., Bogdanov Y.A., Shevchenko V.P., Rusakov V.Y., Isaeva, A.B.* A study of vertical fluxes of sedimentary material and its composition in the Norwegian Sea in the summer periods of 1991–1995 // *Geochemistry International*. 2000. 38(2). P. 169–183.
- Mityaev M.V., Gerasimova M.V., Druzhkova E.I.* Vertical particle fluxes in the coastal areas of the Barents and White Seas // *Oceanology*. 2012. Vol. 52(1). P. 112–121.
- Morris T.H., Clark D.L., Blasco S.M.* Sediments of the Lomonosov Ridge and Makarov Basin: A. Pleistocene Stratigraphy for the North Pole // *Bull. Geol. Soc. America*. 1985. Vol. 96. P. 901–910.
- Not C., Hillaire-Marcel C.* Time constraints from  $^{230}\text{Th}$  and  $^{231}\text{Pa}$  data in late Quaternary, low sedimentation rate sequences from the Arctic Ocean: An example from the northern Mendeleev Ridge // *Quaternary Science Reviews*. 2010. Vol. 29. P. 3665–3675.
- Pavlidis Y.A., Ogorodnikov V.I., Shelekhova E.S., Wahsner M.* Lithology and geochemistry of modern sediments of the Chukchi Sea. Surface-Sediment Composition and Sedimentary Processes in the Central Arctic Ocean and Along the Eurasian Continental Margin // *Reports on Polar Research*. 1996. Vol. 212. P. 119–125.
- Politova N.V., Shevchenko V.P., Zernova V.V.* Distribution, composition, and vertical fluxes of particulate matter in Bays of Novaya Zemlya Archipelago, Vaigach Island at the end of summer // *Advances in Meteorology*. 2012. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/259316>.
- Polyakova Y.I., Novichkova Y.A., Lisitzin A.P., Bauch H.A., Rybalko A.Y.* Modern data on the biostratigraphy and geochronology of White Sea sediments // *Doklady Earth Sciences*. 2014. Vol. 454. No. 2. P. 169–174.
- Sellen E., Jakobsson M., Frank M., Kubik P.W.* Pleistocene variations of beryllium isotopes in central Arctic Ocean sediments // *Global and Planetary Change*. 2009. Vol. 68. P. 38–47.
- Shevchenko V.P., Ivanov G.I., Burovkin A.A., Dzhinoridze R.N., Zernova V.V., Polyak L.V., Shanin S.S.* Sedimentary material flows in the St. Anna Trough and eastern Barents Sea // *Doklady Earth Sciences*. 1998. Vol. 359. No. 3. P. 400–403.
- Stein R.* Arctic Ocean sediments. Processes, proxies, and paleoenvironment / Amsterdam: Elsevier, 2008. 592 p.

## THE SPEED OF SEDIMENTATION, VERTICAL FLOW OF MATTER, AND THE ABSOLUTE MASS OF PRECIPITATION IN THE SHELF REGION OF THE RUSSIAN ARCTIC

A.N. Novigatsky, A.A. Klyuvitkin, A.P. Lisitzin

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nahimovskiy pr., Moscow, 117997, Russia, e-mail: [novigatsky@ocean.ru](mailto:novigatsky@ocean.ru)*

Submitted 22.06.2018, accepted 10.09.2018

A new approach has been applied in the study of marine sedimentation using the scattered sedimentary material of the water column obtained by means of sediment traps (vertical

sediment fluxes), in comparison with the surface layer of bottom sediments (absolute masses). This opens the possibility in situ (through sediment fluxes in the water column) to study modern sedimentation in the surface layers of sediments, and at the current technological level understand the relationship of sedimentary processes with the natural environment and climate. Opportunity to solve the inverse problem - on the velocities (or absolute masses) of precipitation is restored to restore the fluxes of matter and chemical elements in the seas of the geological past.

**Keywords:** vertical sediment fluxes, sedimentation traps, Arctic Ocean, Arctic shelf

### References

- Aliev R., Bobrov V., Kalmykov S., Melgunov M., Vlasova I., Shevchenko V., Novigatsky A., and Lisitzin A. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007, Vol. 274(2), pp. 315–321.
- Bringue A. and Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort sea, Canadian Arctic). *Marine Geology*, 2012, Vol. 291–294, No. 3, pp. 83–96.
- Gaye B., Fahl K., Kodina L. A., Lahajnar N., Nagel B., Unger D., and Gebhardt, A. C. Particulate matter fluxes in the southern and central Kara Sea compared to sediments: Bulk fluxes, amino acids, stable carbon and nitrogen isotopes, sterols and fatty acids. *Continental Shelf Research*, 2007, Vol. 27(20), pp. 2570–2594.
- Grigoriev M.N., Rachold V., Schirrmeister L., and Hubberten H.W. Organic carbon input to the Arctic Seas through coastal erosion. In *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Ed. R. Stein and R. Macdonald. Springer-Verlag Berlin, 2004, pp. 41–45.
- Gordeev V.V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean. *Geomorphology*, 2006, Vol. 80(1–2), pp. 94–104.
- Gusev E.A., Maksimov F.E., Novikhina E.S., Kuznetsov V.Yu., Levchenko S.B., Zherebtsov I.E., and Baranova N.G. On stratigraphy of bottom sediments from Mendeleev Rise (the Arctic Ocean) Region. *Vestnik Saint-Petersburg University*, 2012, Vol. 4, pp. 102–115.
- Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N. V., Repina I., Sandø A. B., Smedsrud L. H., and Smirnov A. Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: A suggested positive feedback. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, Vol. 46 (5), pp. 1437–1456.
- Ivanova E.V., Murdmaa I.O., Duplessy J.C., and Paterne M. Late Weichselian to holocene paleoenvironments in the Barents Sea. *Global and Planetary Change*, 2002, Vol. 34(3–4), pp. 209–218.
- Kulikov N.N., Lapina N.N., Semenov Yu.P., Belov N.A., and Spiridonov M.A. Stratifikaciya i skorosti nakopleniya donnyh otlozhenij Arkticheskikh morej SSSR. Severnyj Ledovityj okean i ego poberezh'e v kajnozoe. *Leningrad. Gidrometeoizdat*, 1970, pp. 34–41.
- Levitan M.A., Syromyatnikov K.V., and Kuz'mina T.G. Lithological and geochemical characteristics of recent and Quaternary sedimentation in the Arctic Ocean. *Geochemistry International*, 2012, Vol. 50(7), pp. 559–573.
- Lein A.Y., Kravchishina M.D., Politova N.V., Savvichev A.S., Veslopolova E.F., Mitskevich I.N., Ul'yanova N.V., Shevchenko V.P., and Ivanov M.V. Transformation of particulate organic matter at the water-bottom boundary in the Russian Arctic seas: Evidence from isotope and radioisotope data. *Lithology and Mineral Resources*, 2012, Vol. 47(2), pp. 99–128.
- Lein A.Y., Makkaveev P.N., Savvichev A.S., Kravchishina M.D., Belyaev N.A., Dara O.M., and Flint M.V. Transformation of suspended particulate matter into sediment in the Kara Sea in

- September of 2011. *Oceanology*, 2013, Vol. 53(5), pp. 570–606.
- Lisitzin A.P. Processy terrigennoj sedimentacii v moryah i okeanah. Moskva: Nauka, 1991, 272 p.
- Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Vinogradov M.E., Severina O.V., Vavilova V.V., and Mitzkevich I.N. Particle fluxes in the Kara Sea and Ob and Yenisei estuaries. *Oceanology*, 1994, Vol. 34(5), pp. 748–758.
- Lisitzin A.P. Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: recent and past. Springer. 2002, 563 p.
- Lisitzin A.P. Sediment fluxes, natural filtration, and sedimentary systems of a “living ocean”. *Russian Geology and Geophysics*, 2004, Vol. 45(1), pp. 15–48.
- Lisitzin A.P. Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, Vol. 51(1), pp. 12–47.
- Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Filippov A.S., and Politova N.V. Dispersed organic matter and its fluxes in oceans and seas from the example of the White Sea: results of a 12-year study. *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 456, No.1, pp. 635–639.
- Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Aliev R.A., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., and Kravchishina M.D. Comparative study of vertical suspension fluxes from the water column, rates of sedimentation, and absolute masses of the bottom sediments in the White Sea basin of the Arctic Ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2015, Vol. 465, No. 2, pp. 1253–1256.
- Lukashin V.N., Bogdanov Y.A., Shevchenko V. P., Rusakov V.Y., and Isaeva, A.B. A study of vertical fluxes of sedimentary material and its composition in the Norwegian Sea in the summer periods of 1991–1995. *Geochemistry International*, 2000, Vol. 38(2), pp. 169–183.
- Mityaev M.V., Gerasimova M.V., and Druzhkova E.I. Vertical particle fluxes in the coastal areas of the Barents and White Seas. *Oceanology*, 2012, Vol. 52(1), pp. 112–121.
- Morris T.H., Clark D.L., and Blasco S.M. Sediments of the Lomonosov Ridge and Makarov Basin: A Pleistocene Stratigraphy for the North Pole. *Bull. Geol. Soc. America*, 1985, Vol. 96, pp. 901–910.
- Not C. and Hillaire-Marcel C. Time constraints from 230Th and 231Pa data in late Quaternary, low sedimentation rate sequences from the Arctic Ocean: An example from the northern Mendeleev Ridge. *Quaternary Science Reviews*, 2010, Vol. 29, pp. 3665–3675.
- Pavlidis Y.A., Ogorodnikov V.I., Shelekhova E.S., and Wahsner M. Lithology and geochemistry of modern sediments of the Chukchi Sea. Surface-Sediment Composition and Sedimentary Processes in the Central Arctic Ocean and Along the Eurasian Continental Margin. *Reports on Polar Research*, 1996, Vol. 212, pp. 119–125.
- Politova N.V., Shevchenko V.P., and Zernova V.V. Distribution, composition, and vertical fluxes of particulate matter in Bays of Novaya Zemlya Archipelago, Vaigach Island at the end of summer. *Advances in Meteorology*, 2012, <http://dx.doi.org/10.1155/2012/259316>.
- Polyakova Y.I., Novichkova Y.A., Lisitzin A.P., Bauch H.A., and Rybalko A.Y. Modern data on the biostratigraphy and geochronology of White Sea sediments. *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 454, No. 2, pp. 169–174.
- Sellen E., Jakobsson M., Frank M., and Kubik P.W. Pleistocene variations of beryllium isotopes in central Arctic Ocean sediments. *Global and Planetary Change*, 2009, Vol. 68, pp. 38–47.
- Shevchenko V.P., Ivanov G.I., Burovkin A.A., Dzhinoridze R.N., Zernova V.V., Polyak L.V., and Shanin S.S. Sedimentary material flows in the St. Anna Trough and eastern Barents Sea. *Doklady Earth Sciences*, 1998, Vol. 359, No. 3, pp. 400–403.
- Stein R. Arctic Ocean sediments. Processes, proxies, and paleoenvironment. Amsterdam: Elsevier., 2008, 592 p.

## К 40-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ ОТДЕЛА АКУСТИКИ ОКЕАНА В ИНСТИТУТЕ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН. КРАТКИЙ ОЧЕРК ИСТОРИИ

**В.П. Кузнецов**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [vladkuz@ocean.ru](mailto:vladkuz@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.09.2018

В статье приводятся воспоминания автора (свидетеля и участника событий) об образовании 40 лет назад Отдела акустики океана в Институте океанологии им. П.П. Ширшова под руководством академика Л.М. Бреховских. Рассказывается о том, как сформировался коллектив сотрудников отдела. Как плодотворно отдел занимался изучением и освоением морской среды и законов распространения и рассеяния звуковых волн в океане. А также о создании уникальных технических средств для исследований и постройки суперсовременных гидроакустических кораблей «Академик Иоффе» и «Академик Сергей Вавилов», о научно-исследовательских экспедициях этих судов по программам проекта «Мировой океан».

**Ключевые слова:** акустика, гидроакустика, история, звуковые волны, океан, отдел акустики

В январе 2018 г. исполнилось 40 лет со дня образования в 1978 г. Отдела акустики океана в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН. В послевоенные годы государственное понимание значения развития гидроакустических методов изучения океана привело к тому, что решение задач морской гидроакустики было поручено лучшим ученым страны Физического института АН СССР (ФИАН). С 1954 г. Лаборатория академика Н.Н. Андреева в ФИАНе Постановлением СМ СССР была преобразована в Акустический институт АН СССР (впоследствии институту присвоено имя академика Н.Н. Андреева), в котором в процессе развития и обучения молодых сотрудников, а также привлечения ведущих ученых акустиков родилась новая наука «акустика океана». Директором АКИНа стал Леонид Максимович Бреховских. В составе АКИНа были почти все ведущие ученые-акустики страны, некоторые из них представлены на фото 1 и 6. Это были ученые, люди высокой культуры и науки: Н.Н. Андреев, Л.М. Бреховских, Л.Д. Розенберг, Ю.М. Сухаревский, А.В. Римский-Корсаков, В.С. Григорьев, М.А. Исакович, Л.А. Чернов, Ю.П. Лысанов, Б.Д. Тартаковский, И.Е. Михальцев и др.

Однако в результате абсурдных решений Н.С. Хрущева в 1962 г. Акустический институт был выведен из состава АН СССР и передан в промышленное министерство. Автор этого очерка был приглашен на работу в АКИН в 1956 г. на должность радиотехника и начал познавать в институте науку «акустику», затем в МГУ им. М.В. Ломоносова, а океан и науку «акустику океана» с 1978 г. в Институте

океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР. К сожалению, автор один из немногих участников и свидетелей тех лет пишет эти воспоминания на основе собственного опыта и памяти, а также некоторых печатных материалов.



Фото 1. Сабинин К.Д., Акуличев В.А., Галкин О.П., Андреева И.Б., Лысанов Ю.П., Бреховских Л.М., Швачко Р.Ф., Рыбак С.А., Наугольных К.А., Тужилкин Ю.И., второй ряд: Фурдуев С.В., Швачко Л.В., Римский-Корсаков А.В.  
(Из архива Отдела акустики ИО РАН)

Большую роль в сохранении научных кадров и развития акустики океана сыграла поддержка Президента АН СССР академика А.П. Александрова, который придавал большое значение гидроакустическим работам в океане. В результате в 1978 г. по инициативе директора института океанологии им. П.П. Ширшова, чл.-корр. А.С. Моница, при активной поддержке И.Д. Папанина и академика Л.М. Бреховских (фото 2) в структуре ИО АН СССР был создан Отдел акустики океана в составе трех лабораторий, успешно проработавший несколько десятков лет до распада СССР и современных реформ. После перехода в ИОАН академика Л.М. Бреховских он становится бессменным руководителем Отдела акустики и главой научной Школы акустики океана.



Фото 2. Академик Л.М. Бреховских

Для образования Отдела акустики были привлечены научные и технические кадры из Акустического института: А.Г. Воронович, В.В. Гончаров, Ю.Ю. Житковский, В.В. Краснобородько, Б.Ф. Курьянов, В.М. Куртепов, В.В. Савельев, В.Г. Селиванов, Е.А. Селин и др. В соответствии с различными направлениями исследований

в состав Отдела вошли три основные лаборатории: Лаборатория распространения акустических волн (РАВ, зав. Бреховских Л.М.), Лаборатория шумов и флуктуаций звука (ШИФ, зав. Курьянов Б.Ф.) и Лаборатория рассеяния и отражения звука (РОЗ, зав. Житковский Ю.Ю.).

Первые годы становления Отдела были посвящены подбору молодых кадров из МФТИ и МГУ, а также разработке и созданию специализированной аппаратуры для проведения акустических исследований в морских экспедициях. Ежегодно проводились экспедиции по программам акустических исследований в самых различных районах Мирового океана на научно-исследовательских судах (НИС) Института океанологии. Была разработана уникальная аппаратура: автономные донные станции (АДС) для измерения собственных шумов океана и шумов судоходства; глубоководный гидроакустический комплекс (ГАК) для исследования рассеяния звука объемными неоднородностями и границами океана; акустический зонд «Триада» для измерения звукового поля в широкой полосе частот одновременно с гидрофизическими параметрами среды; глубоководный зонд для изучения объемного рассеяния звука и вертикальных профилей поля скорости звука в океане с помощью параметрического излучателя и другое оборудование. Хочу вспомнить имена творцов этой уникальной для того времени аппаратуры. Перечислю их в произвольном порядке: В.А. Деревнин, Г.К. Тимашкевич, В.Д. Никифоров, А.Ю. Волков, Ю.И. Кочетков, Д.А. Тилинин, В.В. Савельев, А.И. Зотов, А.В. Носов, В.Н. Кузнецов, В.Г. Селиванов, С.А. Дремучев, Н.Н. Лаврентьев, Ю.А. Чепурин, А.В. Березуцкий, В.А. Мозговой, А.В. Фокин, А.И. Веденев, Н.Н. Дмитриевский и др. Новый этап в развитии технических средств начался в 1981 г. с момента начала проектирования, строительства и оборудования специальных акустических судов. Научную группу по разработке и проектированию судов возглавил проф. Житковский Ю.Ю., а организационное управление проектом и техническое сопровождение – к.т.н. Мордвинов Б.Г. В итоге в 1988–1989 гг. флот Академии наук СССР пополнился двумя высококлассными научно-исследовательскими судами «Академик Сергей Вавилов» (1988) и «Академик Иоффе» (1989), предназначенными для выполнения комплексных гидрофизических и акустических исследований Мирового океана. Оба судна были оборудованы излучающими и приемными системами, мощными широкополосными генераторами и большим количеством различных многоэлементных антенн на днище и в шахтах кораблей, многолучевыми эхолотами, информационно-вычислительной и еще многими судовыми системами, которые, к сожалению, после развала СССР были не востребованы, а отдельные элементы систем частично демонтированы.

На новом этапе после выхода новых судов (1988–1994 гг.) было проведено 13 научно-исследовательских экспедиций на этих судах по различным акустическим программам проекта «Мировой океан», из которых шесть совместных рейсов. Исследования в океане проводились по следующим основным направлениям: дальнейшее распространение звука в неоднородном океане, томография среды и донных осадков океана, исследования акустических шумов, отражение и рассеяние звука

неоднородностями поверхности дна и внутренней среды океана с применением только разработанных параметрических антенн и гидролокаторов методами нелинейной акустики. Краткое описание этих исследований и их результатов приведено в книге (Кузнецов и др., 2002). Более полное изложение работ Отдела акустики океана, которые проводились сотрудниками и учениками Л.М. Бреховских в лабораториях РАВ и ШИФ приведены в двух недавних статьях (Воронович, 2017) и (Гончаров, Веденев и др., 2017), написанных его учениками и посвященные 100-летию академика Л.М. Бреховских (Гончаров и др., 2017). Эти исследования, инициированные и выполненные под руководством Леонида Максимовича, несомненно, внесли выдающийся вклад в мировую науку.

Помимо работ, названных выше, в эти годы проводились экспериментальные и теоретические исследования и в Лаборатории рассеяния и отражения звука, руководимой проф. Ю.Ю. Житковским. Поскольку я работал в этой Лаборатории, мне хочется рассказать об этих работах и ее сотрудниках немного больше.

В течение одного десятилетия 80–90-х гг. Ю.Ю. Житковским были организованы и проведены на различных судах Института океанологии: «Академик Мстислав Келдыш», «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе», шесть комплексных научных экспедиций в различных районах Мирового океана, посвященных изучению акустических сигналов, рассеянных дном, поверхностью и внутренней средой океана. Наиболее важным в организации этих экспедиций являлось то, что в них наряду с изучением характеристик рассеянных акустических сигналов проводилось самостоятельное исследование причин и объектов в океане, вызвавших то или иное рассеяние звука, т.е. дно изучали морские геологи, звукорассеивающие слои (ЗРС) – биологи, а среду океана – гидрологи и гидрофизики. Действительно, ведь упругие волны, рассеянные дном или другими объектами, несут информацию о его характеристиках, а чтобы ее выделить и проанализировать, необходимо знать свойства и характеристики этих объектов и в результате «научить» акустические приборы расшифровывать эту информацию. Поэтому в экспедиции всегда включались отряды геологического и геоморфологического исследования дна, биологии, гидрофизических исследований, сейсмологии и т.д. В акустические экспедиции приглашались специалисты из других организаций, разрабатывающих новейшие и перспективные гидроакустические приборы и методики исследований океана и обработки сигналов, это: ТРТИ (Таганрог), ИРЭ (из Москвы и Харькова), МФТИ, ВНИИФТРИ, ИПФ АН СССР и многих других. Особенно хочется вспомнить многократное участие в экспедициях специалистов-«нелинейщиков» из Таганрога со своими параметрическими антеннами. Это содружество оказалось весьма полезным как в плане отработки уникальных характеристик параметрической аппаратуры, так и в исследованиях рассеяния звука в океане.

Остановлюсь вкратце на основных направлениях и результатах работ сотрудников лаборатории РОЗ по трем основным темам.

### **Рассеяние и отражение звука дном**

В 1980 г. Ю.Ю. Житковским и В.В. Савельевым с сотрудниками был разработан и создан глубоководный гидроакустический комплекс ГАК-1. Этот аппаратный комплекс, опускаемый на кабель-тресе длиной 6 км, позволил провести исследования локальных характеристик рассеяния звука дном глубокого океана тонально-импульсным методом. С помощью ГАКа были проведены многочисленные исследования угловых, частотных и флуктуационных характеристик коэффициента рассеяния звука в различных геоморфологических районах Атлантического, Индийского и Тихого океанов. В круг этих исследований входили районы дна океана, содержащие скопления железомарганцевых конкреций (ЖМК), а также возможность проверки способа разведки ЖМК на дне океана акустическими методами. Акустические методы кроме ГАКа включали исследования акустических характеристик дна с помощью штатных судовых узколучевых глубоководных и параметрических эхолотов, а также получения карты расположения на дне скоплений ЖМК гидролокатором бокового обзора (ГБО).

Исследования показали, что коэффициент рассеяния звука от участков дна, где располагаются крупные ЖМК, может в несколько раз превышать его значения для участков с малым их содержанием. Частотные и угловые зависимости коэффициента рассеяния также выявляли зависимости от размеров ЖМК и доминирующей роли наличия конкреций в процессе рассеяния по сравнению с подстилающей поверхностью.

Получение экспериментальных данных на низких частотах ниже 1 кГц связано с рядом технических и методических проблем. Уникальная низкочастотная электродинамическая излучающая антенна на судне «Академик Иоффе» позволила исследовать трассы распространения звука протяженностью в несколько тысяч километров даже в штормовых условиях при высоком уровне шумов. Впервые в практике акустических исследований дна океана измерены угловые и частотные характеристики коэффициента отражения звука на столь низких частотах 25–450 Гц в глубоководных и мелководных районах Мирового океана. Средние значения измеренных коэффициентов, в основном, лежат в пределах 0,2–0,3.

### **Рассеяние звука ЗРС в океане**

Работы по исследованию рассеяния звука морскими организмами, образующими звукорассеивающие слои (ЗРС), проводились Лабораторией РОЗ с 1980 г. Была создана методика и аппаратура для широкополосных локальных исследований ЗРС, позволяющая получить частотные зависимости объемного рассеяния звука на конкретных горизонтах в диапазоне частот от 2 кГц до 50 кГц, и таким образом получать сведения о «тонкой структуре» и составе ЗРС на различных горизонтах в различных районах. Аппаратура позволяла узнавать и о роли различных организмов в формировании рассеянного поля, «акустического поведения» рассеивателей, а также оценивать эффективность орудий лова и адекватность моделей рассеяния.

Суть методики таких измерений состояла в том, что погружаемое устройство, снабженное излучателем и приемником звука, опускалось на кабель-тросе с борта судна на различные горизонты, где излучался зондирующий сигнал, представляющий собой ЧМ импульс с высоким уровнем гармоник, а акустический сигнал, рассеянный малым объемом вокруг устройства, принимался и подавался на борт судна для последующей обработки. На многих измеренных в разных районах локальных частотных зависимостях объемного рассеяния звука заметно существование двух диапазонов, граница между которыми находится приблизительно на частоте 25 кГц, что соответствует известным представлениям о характере рассеяния звука в ЗРС. На частотах ниже 25 кГц доминирует резонансное рассеяние на плавательных пузырях рыб, частотные зависимости силы объемного рассеяния содержат ряд резонансных максимумов и подвержены значительной суточной изменчивости, связанной с вертикальной миграцией рыб. На частотах выше 25 кГц объемное рассеяние звука теряет резонансный характер, суточная изменчивость рассеяния ослабевает. Наиболее ярко суточная изменчивость рассеяния выражена на низких частотах.

#### **Объемное рассеяние звука гидрофизическими неоднородностями океана**

В толще океана звук рассеивается не столько на неоднородностях мелкомасштабных флуктуаций гидрофизических полей температуры, плотности, турбулентного движения и течений, сколько на дискретных неоднородностях биологического происхождения и различного рода взвесях, воздушных пузырьках и т.п. Обычно в экспериментах по обратному объемному рассеянию звука в океане регистрируется суммарный эффект от всех рассеивателей, и разделить вклады различных рассеивателей при обратном рассеянии практически невозможно. Наибольшей трудностью, препятствующей обнаружению и выделению сигналов, рассеянных структурными неоднородностями водной толщи океана, является их малая интенсивность. Этот эффект наиболее слабый из всех наблюдаемых и поэтому обычно маскируется рассеянием, обусловленным другими видами рассеивателей. Причиной малой интенсивности обратного рассеяния является селективный характер рассеяния, при котором в обратном направлении дают вклад волны, рассеянные лишь неоднородностями с пространственным периодом, равным половине длины волны падающего излучения (закон Брэгга). Учитывая, что длина волны используемых гидроакустических систем обычно редко превышает 20 см, ясно, что основной вклад дают неоднородности с масштабами менее 10 см, т.е. микроструктурные образования, которые, в свою очередь, являются наименее энергонесущей частью пространственного спектра флуктуаций неоднородностей в океане. Такая ситуация чрезвычайно затрудняет задачу интерпретации экспериментальных данных по рассеянию звука гидрофизическими неоднородностями океана. Натурные комплексные измерения пространственно-временных характеристик рассеянных звуковых полей и одновременные с ними измерения структурных параметров рассеивающей среды проводились сотрудниками лаборатории РОЗ в многочисленных районах Мирового океана как с помощью специально созданной в лаборатории аппаратуры, так и с применением

штатных судовых эхолотов и гидролокаторов «NBS», «Парасаунд», «ADCP», STD зонд «Розетта» и др. При разработке специального зонда для изучения объемного рассеяния в лаборатории РОЗ особое внимание было уделено созданию высокочувствительного канала измерения скорости звука, с помощью которого можно было проводить оперативное выделение горизонтов с повышенным уровнем тонкой структуры и вычислять статистические характеристики неоднородностей еще в процессе зондирования. Для сопоставления результатов акустических экспериментов с теоретическими оценками проводились соответствующие расчеты ожидаемой величины силы обратного объемного рассеяния звука на основе STD измерений. В качестве исходной модели рассеивающей среды бралась модель изотропных неоднородностей. В проведенных натурных исследованиях установлено, что во всех районах исследований в диапазоне глубин 0–1000 м поле объемного рассеяния звука в целом имело сложную структуру, отличалось неоднородностью по глубине и имело перемежающийся характер. Абсолютные значения силы обратного объемного рассеяния лежали в пределах от -96 дБ до -48 дБ, что соответствовало ее различию почти на пять порядков. Максимальные зарегистрированные вертикальные градиенты силы рассеяния составляли 0,5–0,6 дБ/м. Установлено, что во всех районах исследований ожидаемые уровни рассеяния звука на гидрофизических неоднородностях не превышали экспериментально измеренные, а среднее превышение экспериментальных значений над расчетными составляло 16–18 дБ, и, как правило, уменьшалось с ростом частоты.

Впервые в практике океанологических исследований акустические характеристики рассеяния звука в океане начали изучаться с помощью параметрических излучающих антенн еще в 1981 г. сотрудниками лаборатории РОЗ и ТРТИ им. Калмыкова. Такие антенны отличаются от классических отсутствием боковых лепестков излучения и постоянством диаграммы направленности в широкой полосе частот, что позволяет снимать локальные частотные характеристики рассеяния и отражения звука в условиях мелководья и низких частот. В этих работах с помощью перестраиваемых в диапазоне частот 5 кГц–50 кГц тонально-импульсных сигналов была исследована тонкая частотная зависимость обратного рассеяния звука от слоя скачка и зарегистрированы колебания его глубины, вызванные внутренними волнами в океане.

Помимо вышеперечисленных работ в лаборатории РОЗ велись теоретические и модельные исследования процессов рассеяния звука. Физическое моделирование гидроакустических явлений в лабораторном бассейне было выполнено для исследований по рассеянию звука от дна, поверхности океана, а также от объемных неоднородностей среды и проанализированы полученные результаты с точки зрения влияния указанных эффектов на распространение звука в океане.

Полное описание некоторых работ по распространению и рассеянию линейного и нелинейного звука в океане и бассейне, выполненных в Лаборатории РОЗ, приведено в двух книгах (Воронин и др., 2007) и (Кузнецов, 2010).

Анализ многочисленных исследований характеристик рассеяния и отражения звука гидрофизическими неоднородностями, ЗРС и дном глубоких и мелких районов Мирового океана, выполненных в эти годы в Институте океанологии им. П.П. Ширшова, позволили значительно расширить наши знания в этой области и внести заметный вклад в теорию и практику акустики океана. Все эти теоретические, экспериментальные и экспедиционные работы по исследованию процессов рассеяния и отражения звука в океане под руководством проф. Юрия Юрьевича Житковского выполняли сотрудники Лаборатории РОЗ: А.В. Березуцкий, Н.Н. Дмитриевский, А.С. Зайцев, А.Ю. Захлестин, А.И. Зотов, В.Н. Кузнецов, В.П. Кузнецов, А.В. Куликов, С.Э. Максимов, В.А. Мозговой, Б.Г. Мордвинов, А.В. Носов, В.В. Савельев, А.В. Фокин, Т.Н. Шокина и др.

Особенно хочется вспомнить недавно ушедшего от нас **Баррикадо Георгиевича Мордвинова** (фото 3). 37 лет он отдал службе на боевых кораблях ВМФ и в различных НИИ. Участвовал в Великой отечественной войне. Более 30 лет Баррикадо Георгиевич посвятил научной и организационной работе, скрепляя дружелюбную обстановку в Лаборатории РОЗ и Отделе акустики океана ИО РАН. Друг и помощник Ю.Ю. Житковского в делах Лаборатории и организации работ по составлению технического задания на постройку и техническое проектирование, сопровождению совместных проектов, наблюдению за проектированием и постройкой НИС «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе», организацию испытаний и приемки судов. Он автор нескольких статей и книг по системам навигации и один из пионеров, участвовавших в разработке и испытаниях системы ГЛОНАС. Составление и написание книги «Акустические океанологические исследования и экспедиции» (Кузнецов и др., 2002) – полностью его заслуга. Сколько лет он отдал океану и морскому делу – это уже никому не подсчитать. В памяти он всегда боевой моряк, капитан первого ранга, штурман дальнего плавания, яхтенный капитан и мастер по парусным видам спорта.



Фото 3. Б.Г. Мордвинов 1926-1916

Не останавливаясь на подробном рассказе о нашей истории в этом кратком очерке, нужно отметить, что результаты выполненных акустиками-океанологами обширных исследований Мирового океана за четверть века в экспедициях были опубликованы в статьях и книгах, получивших признание мировой научной общности. К сожалению, после 1994 г. экспедиционная деятельность Отдела акустики океана практически прекратилась по известным причинам, уникальные акустические суда «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе» частично используются для других исследований. Издана только одна малотиражная книга, напечатанная в Ростове-на-Дону, в которой собраны все сведения об акустических экспедициях – «Акустические океанологические исследования и экспедиции». В этой книге приведены посвящения к 85-летию Л.М. Бреховских и памяти Ю.Ю. Житковского, а также отчеты морских экспедиций Института океанологии с богатейшим научным и методическим материалом (Кузнецов и др., 2002). Экспедиционным исследованиям по акустике океана также посвящена работа (Житковский и др., 2002).

При осмысливании различных отрезков долгой жизни в науке всегда интересно вспомнить, с чего начинали, как был сделан важный первый шаг, кто стоял у истоков, кто был рядом, чья идея стала основополагающей. Уходят в историю люди и их дела, но память о них должна сохраняться в рукописях и электронном виде. Вся моя жизнь в науке начиная с 1956 г. проходила в коллективах сотрудников, руководимых Леонидом Максимовичем Бреховских (за исключением нескольких трудных лет), и память о нем и его научных выдающихся трудах и книгах, конечно, сохранится навсегда, но о некоторых его соратниках и учениках мне хотелось вспомнить хотя бы кратко. Это профессора Юрий Юрьевич Житковский, Юрий Павлович Лысанов и Борис Федорович Курьянов. Они – ученики Леонида Максимовича, его многолетние сотрудники и соавторы – были во главе создателей Отдела акустики океана в ИО РАН им. П.П. Ширшова.

**Юрий Юрьевич Житковский** (1929–1996) окончил МФТИ и с 1957 г. сотрудник Акустического института АН СССР. Его научные интересы связаны с акустическими методами рассеяния звука дном, поверхностью и средой океана. В 1966 г. он защитил кандидатскую, а в 1973 г. стал доктором физико-математических наук. В 1976 г. получил Государственную премию СССР за коллективную монографию «Акустика океана». В 1978 г. перешел в ИО АН СССР, возглавив лабораторию, и читал лекции студентам МФТИ; профессор и зам. зав. кафедрой гидрокосмоса, был неофициальным заместителем, «правой рукой» Л.М. Бреховских по всем организационным вопросам Отдела акустики океана Института океанологии. Ю.Ю. Житковским выполнены фундаментальные работы по рассеянию звука в океане. Концепция рассеяния звука дном океана, развитая Юрием Юрьевичем на основании выполненных им экспериментов в многочисленных районах Мирового океана, является общепризнанной и подтвердила основополагающую роль рельефа дна в формировании отраженных сигналов.



Фото 4. Планирование работ научной экспедиции, академик Л.М. Бреховских и проф. Ю.Ю. Житковский (справа) в 11 рейсе НИС «Академик Келдыш»

Все работы по исследованию рассеяния звука в океане выполнялись не «под его руководством», а им лично – от изготовления аппаратуры и проведения экспериментов до интерпретации, осмысливания, систематизации, анализа и обобщения полученных данных. Совершив свой первый рейс на НИС «Витязь» в 1958 г., Житковский участвовал в двадцати шести экспедициях, более половины которых, он сам организовывал и возглавлял (см. фото 4, – планирование работ вместе с Л.М. Бреховских в экспедиции). Я участвовал в шести рейсах под его руководством и всегда отмечал глубокую и всестороннюю подготовку как научной программы рейсов, так и его обширные историко-географические познания в экскурсиях во время заходов судна в иностранные порты, встреч с сотрудниками научных и административных организаций и посольств этих стран. Ю.Ю. Житковский был высокообразованным человеком и ученым, оставившим значительный след как в фундаментальной, так и в прикладной и экспериментальной акустике. Им опубликовано более полутора десятка научных статей и книг, он был мастером парусного спорта, действительным членом Географического общества России, членом редколлегии «Акустического журнала» и журнала «Вокруг света», был нумизматом и филателистом и любил жизнь во всех ее проявлениях. После его раннего ухода Лабораторию РОЗ быстро расформировали.

#### **Борис Федорович Курьянов (род. 18.06.1932)**

Окончив физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1955 г., Б.Ф. Курьянов начал работать в Теоретическом отделе Акустического института АН СССР под руководством профессора М.А. Исаковича. В 1975 г. он приглашен на работу в Институт океанологии, где в 1978 г. возглавил Лабораторию шумов и флуктуаций звука в океане.

В числе его научных интересов теоретические исследования по рассеянию звука неровной поверхностью, корреляционные свойства волновых полей, обработка сигналов и шумов океана. Им развиты теоретические модели распространения и рассеяния шумов в среде океана, он был одним из пионеров освоения метода быстрого преобразования Фурье. Наибольшую известность получила



Фото 5. Б.Ф. Курьянов, зав. лаборатории ШИФ ИО РАН

двухмасштабная модель рассеяния волн на неровной поверхности. Предложенный теоретический подход оказался наиболее адекватным реальному процессу рассеяния всех видов волн на неровных поверхностях. По материалам этих работ он защитил диссертацию доктора физ.-мат. наук. Борис Федорович удачно сочетает в себе профессионализм теоретика и экспериментатора. Ученый участвовал во многих океанических экспедициях, часть которых сам организовывал и возглавлял. Под его руководством был разработан и создан парк современных измерительных установок и приборов – автономных донных станций и буев управляемой плавучести с многоэлементными антеннами и микропроцессорами на борту. Эта техника была использована в многочисленных экспедиционных исследованиях шумовых полей в различных районах Мирового океана. В настоящее время тяжелая болезнь не позволяет Борису Федоровичу продолжить начатую работу и Лабораторией руководит А.И. Веденев.



Фото 6. На одной из последних школ с присутствием Л.М. Бреховских. Слева направо, 1-й ряд: Ю.П. Лысанов, С.В. Фурдуев, Л.М. Бреховских, И.Б. Андреева, Б.Ф. Курьянов, 2-й ряд: В.В. Гончаров, О.П. Галкин, Ю.А. Чепурин, К.Д. Сабинин, Р.Ф. Швачко, А.Н. Гаврилов

### **Юрий Павлович Лысанов (1922–2010)**

Юрий Павлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Термо-гидромеханики океана» МФТИ, ведущий научный сотрудник Акустического института, Лауреат Государственной премии СССР, участник Великой

Отечественной войны (см. фото 6, первый слева). Он окончил Пермский государственный университет в 1952 г. и аспирантуру ФИАН в 1955 г., где начиналась его научная деятельность в области акустики океана и смежных областей геофизики. Юрий Павлович выполнил обширные исследования по распространению, рассеянию и дифракции волн в океане. Широкое признание получила написанная им совместно с Л.М. Бреховских монография «Теоретические основы акустики океана», вышедшая несколькими изданиями на русском и английском языках. Большой цикл работ посвящен исследованию рассеяния звука дном океана. Результаты этих работ составили основу акустических методов определения параметров донного рельефа, неоднородностей подводного грунта, а также новых корреляционных методов определения скорости движения и смещения судна относительно дна. Разработаны геоакустические модели дна, как для глубоководных, так и для мелководных районов Мирового океана. Развита статистическая модель верхнего слоя осадков с учетом анизотропии объемных неоднородностей. Юрий Павлович является одним из соавторов акустического метода поиска и разведки железомарганцевых конкреций на дне глубокого океана, а также участником в изучении влияния внутритермоклинных вихревых линз и тонкой структуры гидрофизических процессов на акустические поля в океане. Юрий Павлович вел систематическую педагогическую работу на кафедре МФТИ, где уделял большое внимание подготовке высококвалифицированных кадров, о чем, конечно, помнят многие сотрудники Института океанологии, выпускники МФТИ, был членом редколлегии журнала «Океанология».

В заключение хочу выразить надежду, что наука об океане, призванная приносить пользу человечеству, будет успешно развиваться в РФ и возродится широкая экспедиционная деятельность Отдела акустики океана. Это необходимо для более глубокого изучения и, что особенно важно, сохранения природы океана, так как ресурсы жизни на Земле не безграничны. Пусть труды наших акустиков не будут забыты.



Фото 7. Л.М. Бреховских в окружении своих учеников и участников Школы по акустике океана

### Литература

- 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.
- Воронович А.Г. Воспоминания о Л.М. Бреховских // Океанологические исследования. 2017. Т. 45. № 1. С. 212–215.
- Гончаров В.В., Веденев А.И., Цыплакова Т.И. Академик Л.М. Бреховских в отделе акустики океана ИОРАН // Океанологические исследования. 2017. Т. 45. № 1. С. 216–230.
- Гончаров В.В., Свиридов С.А., Цыплакова Т.И. К 100-летию академика Л.М. Бреховских // Океанологические исследования. 2017. Т. 45. С. 196–211.
- Житковский Ю.Ю., Кузнецов В.П., Куртепов В.М., Курьянов Б.Ф., Мордвинов Б.Г., Постнов Г.А., Чепурин Ю.А. Экспедиционные исследования по акустике океана в ИОРАН в 70–90-х годах // IX школа-семинар акад. Л.М.Бреховских «Акустика океана». М.: ГЕОС, 2002. С. 27–34.
- Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тимошенко В.И. Акустические океанологические исследования и экспедиции. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2002. 544 с.
- Кузнецов В.П. Нелинейная акустика в океанологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 264 с.
- Михальцев И.Е. Акустика океана и акустические методы его исследования // IX школа-семинар акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана». М.: ГЕОС, 2002. С. 13–22.

## TO THE 40TH ANNIVERSARY OF THE CREATION OF THE DEPARTMENT OF OCEAN ACOUSTICS AT THE SHIRSHOV INSTITUTE OF OCEANOLOGY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES. A BRIEF HISTORY OUTLINE

V.P. Kuznetsov

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, 117997, Russia, e-mail: vladkuz@ocean.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.09.2018

The author (witness and participant) memories of the formation of the Ocean Acoustics Department 40 years ago at the Shirshov Institute of Oceanology under the supervision of academician L.M. Brekhovskikh; about the fruitful period of the formation and development of the team's staff in the study and development of the marine environment and the laws of propagation and scattering of sound waves in the ocean; on the creation of unique technical facilities for research and construction of ultramodern hydroacoustic research vessels «Academician Ioffe» and «Academician Sergei Vavilov» and cruises research of these vessels under the programs of the «World Ocean» project.

**Keywords:** acoustics, hydroacoustics, history, sound waves, ocean

### References

- Goncharov V.V., Vedenev A.I., and Tsyplakova T.I. Akademik L.M. Brekhovskikh v otdele akustiki okeana IOРАН. *Okeanologicheskie issledovaniya*, (Academician L.M. Brekhovskikh in the ocean acoustics department of the IO RAS), 2017, Vol. 45, No. 1, pp. 216–230.

- Goncharov V.V., Sviridov S.A., and Tsyplakova T.I.* K 100-letiyu akademika L.M. Brekhovskikh. (The 100th anniversary of the academician Leonid M. Brekhovskikh). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2017, Vol. 45, pp. 196–211.
- Kuznecov V.P., Mordvinov B.G., and Timoshenko V.I.* Akusticheskie okeanologicheskie issledovaniya i ehkspedicii (Acoustic oceanographic research and expeditions), Rostov-on-Don: Rostizdat, 2002, 544 p.
- Kuznecov V.P.* Nelinejnaya akustika v okeanologii (Nonlinear acoustics in oceanology). Moscow: FIZMATLIT, 2010, 264 p.
- Mihal'cev I.E.* Akustika okeana i akusticheskie metody ego issledovaniya. (Acoustics of the ocean and acoustic methods of its study). IX shkola-seminar akad. L.M. Brekhovskikh Akustika okeana, (Ocean Acoustics, Proceedings of the IX-th L.M. Brekhovskikh Conference), Moscow: GEOS, 2002, pp. 13–22.
- Voronin V.A., Kuznecov V.P., Mordvinov B.G., Tarasov S.P., and Timoshenko V.I.* Nelinejnye i parametricheskie processy v akustike okeana (Nonlinear and parametric processes in ocean acoustics), Rostov-on-Don.: Rostizdat, 2007, 448 p.
- Voronovich A.G.* Vospominaniya o L.M. Brekhovskikh, (Memories about L.M. Brekhovskikh), *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2017, Vol. 45, No. 1, pp. 212–215.
- Zhitkovskij Yu.Yu., Kuznecov V.P., Kurtepov V.M., Kur'yanov B.F., Mordvinov B.G., Postnov G.A., and CHepurin Yu.A.* Ehkspedicionnye issledovaniya po akustike okeana v IO RAN v 70-90-h godah. (Expeditionary research on ocean acoustics in the IO RAS in the 70-90 s.), IX shkola-seminar akad. L.M. Brekhovskikh Akustika okeana, (Ocean Acoustics, Proceedings of the IX-th L.M. Brekhovskikh Conference), Moscow: GEOS, 2002, pp. 27–34.

## К 95-ЛЕТИЮ АЛЕКСАНДРА ПЕТРОВИЧА ЛИСИЦЫНА

**Н.В. Политова, Л.Л. Демина, В.П. Шевченко**

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия,  
e-mail: [politova@ocean.ru](mailto:politova@ocean.ru)*

Статья поступила в редакцию 01.06.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Академик А.П. Лисицын – выдающийся советский и российский морской геолог, один из основоположников морской геологии в России, чьи научные работы в области процессов современной седиментации и рудогенеза широко известны и отмечены государственными и международными наградами и премиями. Им разработаны новые научные направления в области морской геологии: учение о роли взвешенного вещества в океанском осадкообразовании и биодифференциации вещества в океане, о зональном характере биогенной, лавинной, ледовой и аридной седиментации, о геологической истории океанов и палеоокеанологии, о маргинальных фильтрах океана, о закономерностях гидротермального рудообразования.

**Ключевые слова:** Лисицын А.П., морская геология, процессы современной седиментации, палеоокеанология, маргинальные фильтры



А.П. Лисицын

3 июля 2018 г. исполнилось 95 лет академику Александру Петровичу Лисицыну – выдающемуся океанологу и одному из основоположников российской морской геологии, действительному члену Российской академии наук (1994), доктору геолого-минералогических наук (1966), лауреату Государственных премий (1971, 1977), профессору (1974), лауреату премии «Триумф-Наука» (2008), премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2012), создателю и бессменному руководителю Лаборатории физико-геологических исследований Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Международной конференции (Школы) по морской геологии.

А.П. Лисицын родился 3 июля 1923 г. на Шатиловской селекционной станции (Орловская область). Его отец – Петр Иванович Лисицын – академик ВАСХНИЛ, один из инициаторов развития селекции и семеноводства в нашей стране. Его работы по селекции и биологии красного клевера («Среднерусский Шатиловский»), озимой ржи («Лисицынская»), гречихи («Богатырь»), овса («Шатиловский-56»), льна («Кудряш К-39», «Кудряш К-48») стали важным вкладом в развитие сельскохозяйственной науки, а сами сорта используются в России до сих пор. Мать, Александра Германовна Зихман, приехав студенткой Высших женских сельскохозяйственных Голицынских курсов на практику на Шатиловскую станцию в 1913 г., стала верной соратницей отца (Елина О.Ю., 2017).

В 1940 г. по окончании школы с золотой медалью возник вопрос выбора профессии: либо пойти по стопам отца в сельское хозяйство, либо в геологию, которой посвятил жизнь его дядя – профессор-гидрогеолог Константин Иванович Лисицын. А.П. Лисицын поступил в Московский геолого-разведочный институт им. С. Орджоникидзе (МГРИ), где в конце учебного года сдал экзамены не только за первый курс, но и часть экзаменов экстерном за второй. Однако с началом Великой Отечественной войны он прервал учебу и пошел добровольцем в армию. Обучался в Челябинской военной авиационной школе штурманов и стрелков-бомбардиров Авиации Дальнего Действия (АДД). В качестве штурмана АДД по заданию Комитета обороны участвовал в перегоне самолетов с заводов СССР на фронт, из США по трассе Аляска-Сибирь (АлСиб), в бомбардировках глубоко за линией фронта в 1944–1945 г. В 1945 г. А.П. Лисицын был награжден орденом Красной Звезды и медалями.



Фото 2. А.П. Лисицын в годы Великой Отечественной войны, 1945 г.



Фото 3. Студент А.П. Лисицын на практике (Алайская партия), 1948 г.

Осенью того же года он был переведен в гражданскую авиацию для помощи народному хозяйству, а затем продолжил учебу в институте, работая летом в геологических партиях на Алтае и Памире.

В 1948 г., еще будучи студентом, А.П. Лисицын поступил в недавно созданный Институт океанологии АН СССР. Его учителем стал профессор Пантелеймон Леонидович Безруков, автор трудов по морской геологии и теории осадкообразования в океанах, член-корреспондент Академии наук СССР, дважды лауреат Сталинской премии, а в то время – руководитель отдела геологии океана в институте (Безрукова и др., 1983). В 1949 г. А.П. Лисицын принимал участие в первом рейсе НИС «Витязь» в дальневосточных морях (2-ой по нумерации), когда впервые российскими геологами были собраны глубоководные донные осадки.



Фото 4. Отбор проб дночерпателем Океан-50, 1949 г.

С момента окончания в 1950 г. МГРИ Александр Петрович Лисицын работает в Институте океанологии, пройдя путь от лаборанта до заведующего отделом, от студента до академика. Он участвовал более чем в 20 экспедициях, многие из них возглавлял (с 1972 г. – 8-ой рейс НИС «Дмитрий Менделеев» в Тихом океане, до 2007 г. – 53-ий рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Белом море).

Отдел геологии океана в 1949 г. занимался не только научной работой, но и техническими вопросами, так как не было опыта морских геологических работ, а также приборов для геологических исследований на больших глубинах. Все это решалось в процессе экспедиционных работ. Пробы отбирались в условиях качки, когда судно дрейфовало, испытания проходили дночерпатель Океан-50, несколько конструкций грунтовых трубок, чистые пластиковые батометры для получения глубинных вод и т.п. После экспедиций в дальневосточные моря была разработана методика сбора, полевого описания и консервации проб донных осадков (Лисицын, Петелин, 1956). Тогда же П.Л. Безруковым и А.П. Лисицыным (1960) была разработана классификация, а также номенклатура донных отложений на основе гранулометрического и вещественного составов, которой пользуются современные морские геологи. Работы в дальневосточных морях стали основой кандидатской

диссертации А.П. Лисицына о процессах современного осадкообразования в Беринговом море, которая была успешно защищена в 1953 г., а монография по этой теме была переведена на английский язык (1969).

С 1956 г. А.П. Лисицын был прикомандирован к Главсевморпути для участия в первых антарктических экспедициях на дизель-электроходе «Обь» по программе Международного геофизического года в качестве начальника отряда геологии океана. Отряду пришлось заниматься не только геологией, но и строительством, погрузочными работами на станции Мирный.



Фото 5. Геологический отряд 1-ой Антарктической экспедиции на д/э «Обь», 1956 г., А.П. Лисицын у спасательного круга



Фото 6. Геологические работы в 1-ой Антарктической экспедиции в условиях низких температур, 1956 г.

В 1951–1952 гг. в экспедициях в Берингово море А.П. Лисицын впервые начал изучение водной и воздушной взвесей как основного источника осадочного материала в океане. Для получения проб взвеси применялись методы осаждения с центрифугированием и мембранной ультрафильтрацией, позволившие изучить количественное распределение взвешенного вещества как по площади, так и на разных глубинах, а также качественный состав взвеси под микроскопом, сделать первые химические анализы. А в первых научных экспедициях д/э «Обь» в Антарктике



Фото 7. 1-ая Антарктическая экспедиция, работа в сепарационной лаборатории, 1956 г.

водную взвесь впервые отбирали новым сепарационным методом, позволявшим на ходу судна собрать значительное количество взвешенного вещества, необходимое для литологических и геохимических исследований. На основании этих исследований было разработано учение о биодифференциации вещества в океане, установлены закономерности зональности осадконакопления. Работы по изучению рассеянного осадочного вещества (аэрозолей, криозолей, водной взвеси – гидрозолей) как звена процесса современного осадкообразования в морях и океанах продолжают А.П. Лисицыным и его учениками вот уже почти семьдесят лет, развиваются методы обсервации, сбора и анализа осадочного вещества. Современные исследования рассеянного осадочного вещества включают прямые (фильтрация, сепарация, отстаивание) и косвенные (использование спутниковых данных, оптических приборов зондирования водной толщи, кондуктометрические методы) экспедиционные методы, изучение потоков осадочного вещества на автоматических глубоководных седиментологических обсерваториях (АГОС) с седиментационными ловушками и измерителями различных гидрологических параметров, позволяющих говорить об изменениях во времени (4D океанология), а также огромный спектр лабораторных методов изучения микрочастиц.

12 января 1966 г. директором ИО АН СССР профессором А.С. Мониным был издан Приказ № 7 «О создании Кабинета физических методов исследований» при Лаборатории морских отложений, где говорилось, что Кабинет организован «в целях внедрения в практику работ Института современных методов анализа, обеспечивающих получение принципиально новых материалов и автоматизации обработки геологических проб». Возглавил Кабинет с 8 сотрудниками А.П. Лисицын. Необходимо было наладить массовые анализы осадков: спектральных, флюоресцентных, рентгеновских, масс-спектрометрических, минералогических, радиоизотопных (определений палеотемператур по изотопам кислорода, абсолютного возраста по углероду и т.д.). В декабре 1968 г. на базе Кабинета была создана Лаборатория

физико-геологических исследований, которую Александр Петрович возглавляет и по сей день.

В 1966 г. Лисицын защищает докторскую диссертацию по теме «Процессы океанской седиментации».

Весной 1968 г. А.П. Лисицын был приглашен в США для чтения курса лекций по морской геологии. Его вклад в исследования океанского седиментогенеза в том же году был отмечен Международной премией Ф. Шепарда по морской геологии (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, ныне Society for Sedimentary Geology). А на основе лекций Лисицына в США была издана его монография «Sedimentation in the World Ocean» (1972).



Фото 8. 6-ой рейс «Гломар Челленджер», 1969 г.

В 1969 г. А.П. Лисицын первым из советских геологов участвовал в международной экспедиции «Гломар Челленджер» по глубоководному бурению дна Тихого океана (начальники рейса профессора Б. Хизен и Б. Фишер). При обработке кернов бурения на борту судна широко использовались прозрачные препараты осадков (смер-слайды), изучение которых велось под микроскопом. Эта методика разрабатывалась А.П. Лисицыным и В.П. Петелиным еще в первых рейсах «Витязя» (1956). Основной задачей рейса от Гавайских островов до о. Гуам была проверка одного из главных положений тектоники литосферных плит: о закономерном росте возраста фундамента по линейным аномалиям и в сопоставлении с прямыми определениями в кернах. Полученные материалы частично обрабатывались в лабораториях Института океанологии.

Еще в экспедициях в дальневосточных морях делались попытки оценить значение различных факторов и источников осадочного вещества в процессе океанского седиментогенеза. Тогда даже в глубоководных осадках был найден грубо-обломочный материал, позволивший предположить их ледовый генезис. Это явление ледового и айсбергового разноса изучалось затем А.П. Лисицыным в северной части Тихого океана и дальневосточных морях, в антарктических экспедициях 1955–1958 гг., последующих работах в разных морях и океанах. Результатом изучения процессов осадконакопления в полярных регионах стал выход в свет монографии «Ледовая седиментация в Мировом океане» (1994), значительно дополненный

вариант переведен в издательстве Springer Verlag (2002), позже был выделен новый тип седиментогенеза – ледовый морской и сформулированы его особенности (2010).

В обработке материалов первых экспедиций П.Л. Безруковым с коллегами был применен картографический метод анализа пространственных и временных закономерностей осадкообразования, были выработаны новые приемы геологического картирования донных осадков. А.П. Лисицын участвовал в создании 8 атласов, включая «Атлас Антарктиды» и «Морской атлас». В 1971 г. за создание «Атласа Антарктиды» в двух томах группа ученых разных специальностей, среди которых был и А.П. Лисицын, была удостоена Государственной премии СССР в области науки.

С 60-х годов XX столетия в мире были начаты исследования в областях поступления глубинного вещества и энергии, обмена внутренних и внешних геосфер – рифтовые зоны океанов, гидротермальные системы на дне. Институт океанологии начал эти работы в 1972 г. на Восточно-Тихоокеанском поднятии на НИС «Дмитрий Менделеев», где начальником рейса был А.П. Лисицын. В этой и последующих экспедициях удалось детально исследовать и закартировать гигантские области развития металлоносных осадков на участках с высокими и сверхвысокими скоростями спрединга, обнаружить аномалии Fe, Mn, Cu в толще придонных вод. Новая эпоха в отечественной океанологии началась в 1977 г., когда подводные обитаемые аппараты «Пайсис» впервые осуществили прицельный отбор геологических и биологических образцов с глубин около 1,5 км на озере Байкал. В 1980 г. А.П. Лисицын совершил свое первое погружение на глубоководном обитаемом аппарате (ГОА) «Пайсис» в Индийском океане в районе тройственного сочленения и на подводной горе Афанасия Никитина, а затем уже в 1984 г. – в рифте Таджура. С 1988 г. до глубин 6 км начали работать ГОА «Мир». А.П. Лисицын лично участвовал более чем в 30-ти погружениях «Пайсисов» и «Миров» на глубины 5–6 км с геологическими исследованиями и отбором проб; он руководил разработкой методов поиска сульфидных руд и детального геологического картирования дна с помощью ГОА «Мир».



Фото 9. Экипажи «Миров», А.М. Сагалевиц, А.П. Лисицын и Ж. Пикар в центре, 1988 г.

В последующие года по результатам систематического изучения глубоководных гидротермальных районов А.П. Лисицыным, Ю.А. Богдановым, А.Ю. Леин, Л.П. Зоненшайном и М.И. Кузьминым были установлены главные закономерности образования полиметаллических сульфидных руд на дне океанов (современных и древних), позволившие вести поиск и разведку сухопутных месторождений сульфидных руд. Впоследствии эта работа была отмечена Премией Правительства РФ в области науки и техники (2012 г.) – «за создание фундаментальной основы исследования океанского гидротермального рудообразования, открытие крупных рудных объектов в Международном районе океана и получение исключительного права на их разведку в целях расширения минерально-сырьевого потенциала и укрепления геополитического статуса Российской Федерации».

В 1974 г. А.П. Лисицыну было присвоено звание профессора, в том же году он был избран членом-корреспондентом АН СССР.

В 1978 г. под руководством А.П. Лисицына была проведена первая в СССР мультидисциплинарная эколого-геохимическая экспедиция НИС «Академик Курчатов» (рейс 26А) в Балтийское море. Результатом двадцатидвухдневной экспедиции стала трехтомная коллективная монография!

А.П. Лисицын стал одним из создателей новой ветви наук об океане – палеоокеанологии, применив установленные закономерности современного осадкообразования для изучения осадков древних океанов. С 1982 по 1985 гг. он принимал участие в советско-французском проекте «Тетис», возглавляемом Л.П. Зоненшайном и К. Ле Пишоном, целью которого было восстановление истории исчезнувшего океана Тетис. Исследования включали совместные экспедиции в Альпы и Пиренеи, а затем в Крым и на Кавказ. Участвовал Александр Петрович и в других сухопутных работах – на Урале изучал древние отложения гидротермальных руд. Экспедиция установила аналогию в составе и строении среднедевонских базальтовых толщ Южных Мугодзар с породами ложа дна рифтовой долины Красного моря. Реликтами древних островных дуг были признаны вулканогенно-осадочные толщи Ирндыкского хребта и Магнитогорской зоны. Было выявлено сходство колчеданных месторождений Южного Урала с продуктами деятельности «черных курильщиков» на дне рифтовых долин современных срединно-океанических хребтов. По данным палеомагнитных исследований, восстановлено взаиморасположение древних океанических плит, сделаны оценки размеров палеобассейнов.

В 1994 г. А.П. Лисицын стал действительным членом Российской академии наук.

В начале 1990-х годов стала очевидной необходимость комплексного изучения природной среды и ресурсов Арктики, и А.П. Лисицын возглавил экспедиции в Арктические моря (Лаптевых, Карское, Баренцево, Белое), а также в устьевые районы сибирских и северных рек. В ходе этих экспедиций были применены новые методики и приборы, выполнено сравнительное изучение концентрации химического, минерального и изотопного состава осадочного вещества в атмосфере, морских льдах и снеге, в толще морской воды и донных осадков. На основании полученных данных А.П. Лисицын разработал концепцию маргинальных фильтров,

препятствующих проникновению речного осадочного материала, включая антропогенные загрязнения, в открытый океан. Установлено, что маргинальные фильтры задерживают до 95% взвешенных и около 40% растворенных веществ, поступающих с суши. Фильтры многоступенчатые, сочетающие абиогенную и биогенную части. С этих работ постоянными стали совместные исследования с Институтом микробиологии Российской академии наук по изучению роли микроорганизмов в процессах седиментации–рудобразования.



Фото 10. Месторождение Учалы, Южный Урал, открытая разработка колчеданных руд океанского типа, 2000 г., А.П. Лисицын и А.Ю. Леин у ковша гигантского экскаватора



Фото 11. А.П. Лисицын на НЭС «Академик Федоров», 1998 г.

С 90-х годов началось активное сотрудничество А.П. Лисицына с немецкими коллегами: это были программы по изучению моря Лаптевых, «Взаимодействие суша–океан в российской Арктике» LOIRA (Land-Ocean interactions in the Russian Arctic).



Фото 12. А.П. Лисицын с немецкими коллегами директором GEOMAR профессором К. Дуло (слева) и директором AWI профессором Й. Тиде на Байкале, 2004 г.

В последние десятилетия XX века А.П. Лисицыным разработано учение о быстрой и сверхбыстрой (лавинной) седиментации (1988), что привело к новой седиментологической теории прогноза месторождений углеводородного сырья у основания континентального склона, позволяющей в несколько раз сократить расходы на дорогостоящее бурение глубоководных скважин и многократно повысить рентабельность поисковых работ.

На протяжении сорока с лишним лет раз в два года проводится Международная научная конференция (Школа) по морской геологии, инициатором, организатором и бессменным председателем оргкомитета которой является А.П. Лисицын.



Фото 13. Первая Школа по морской геологии, Геленджик, 1974 г.

Всесоюзная Школа по Морской геологии впервые собралась в г. Геленджике на Черном море весной 1974 г. Возникновение и история Школы тесно связаны со становлением морской геологии как новой науки в изучении Мирового океана. Темпы развития

этой науки, огромное количество открытий, новые теории – с одной стороны, и запаздывание публикаций – с другой, привели к необходимости организации регулярных совещаний с обзорными докладами и обсуждениями новейших данных. Вскоре Школы стали международными. А в 2017 г. прошли заседания уже XXII-й Школы, собравшей около четырехсот морских геологов и ученых смежных специальностей.



Фото 14. Школа по морской геологии, заседание секции в кабинете академика А.П. Лисицына, 2007 г.

А.П. Лисицын – лидер ведущей научной школы по океанскому осадкообразованию, им подготовлено 11 докторов наук, свыше 30 кандидатов наук. А.П. Лисицын – учитель и воспитатель молодых научных кадров, а кроме того – талантливый пропагандист и популяризатор науки, консультант ряда документальных фильмов о науке, участник научных программ на радио и телевидении. Им опубликовано 17 личных монографий, из них 6 монографий – за рубежом, свыше 500 научных работ, а также множество карт и несколько атласов, в 39-ти коллективных монографиях он – ответственный редактор. За последние 7 лет вышло из печати четыре тома коллективной монографии «Система Белого моря», где подведен итог многолетних комплексных исследований на Белом море на уровне XXI века. На этом субарктическом море как на полигоне в течение последних 15 лет разрабатывался новый подход в седиментологии, основанный на изучении природных микро- и наночастиц в атмосфере, гидросфере, криосфере и биосфере с количественным определением потоков рассеянного осадочного материала от поверхности до дна моря, процессов его трансформации, пространственно-временной изменчивости под влиянием гидрофизических и биогеохимических процессов. Под руководством А.П. Лисицына также опубликованы другие седиментологические и геохимические монографии: «Система Каспийского моря» (2016) и «Система Балтийского моря» (2017), готовятся обобщения по системам Черного и Баренцева морей. В 2018 г. в издательстве Шпрингер выходит в свет двухтомная коллективная монография «The White Sea Environment» по процессам седиментации в Белом море.

А.П. Лисицын принадлежит к блестящей когорте ученых-новаторов в области океанской седиментологии, его книги и многочисленные журнальные публикации заставили пересмотреть господствовавшие ранее представления о закономерностях

современного и древнего осадкообразования в Мировом океане. Им разработаны новые научные направления в области морской геологии: учение о роли взвешенного вещества в океанском осадкообразовании и биодифференциации вещества в океане, о зональном характере биогенной, лавинной, ледовой и аридной седиментации, о геологической истории океанов и палеоокеанологии, о маргинальных фильтрах океана, о гидротермальном рудогенезе.

Заслуги А.П. Лисицына перед Родиной и наукой высоко оценены руководством страны, среди его наград ордена Отечественной войны (1945), Знак Почета (1961), Трудового Красного Знамени (1975), Дружбы народов (1983), Почета (1998), «За заслуги перед Отечеством» IV степени (2009).

Редакция журнала «Океанологические исследования» поздравляет Александра Петровича с юбилеем, желает ему счастья, научного и человеческого долголетия, а также крепкого здоровья для воплощения своих идей.

### Список монографий А.П. Лисицына:

- Лисицын А.П.* Донные отложения Берингова моря. Труды Института океанологии, 1959. Т. 29.
- Лисицын А.П.* Распределение и химический состав взвеси в водах Индийского океана. М.: Наука, 1964 (Океанология МГУ, № 10). 136 с.
- Лисицын А.П.* Процессы современного осадкообразования в Беринговом море. М.: Наука, 1966. 574 с.
- Лисицын А.П., Богоявленский А.Н.* Геохимия кремнезема. М.: Изд-во АН СССР, 1966.
- Lisitzin A.P.* Processes of recent sedimentation in the Bering Sea. Academic Press. 1969.
- Lisitzin A.P.* Sedimentation in the World Ocean. International Society of Ecology, Paleoceanology and Mineralogy. Special publication. № 17. 1972. 218 p.
- Лисицын А.П.* Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 438 с.
- Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392 с.
- Лисицын А.П., Гурвич Е.Г., Лукашин В.Н., Емельянов Е.М., Зверинская И.Б., Куринов А.Д.* Геохимия элементов-гидролизатов. М.: Наука, 1980. 239 с.
- Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. 1984. 371 с. (на японском языке)
- Лисицын А.П.* Лавинная седиментация и перерывы в осадкообразовании в морях и океанах. М.: Наука, 1988. 310 с.
- Лисицын А.П.* Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М.: Наука, 1991. 270 с.
- Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в Мировом океане. М.: Наука, 1994. 450 с.
- Lisitzin A.P.* Oceanic sedimentation: lithology and geochemistry. Washington. American Geophysical Union, 1996. 390 p.
- Lisitzin A.P.* Sea-ice and iceberg sedimentation in the World Ocean: present and past. Springer Verlag. 2002. 563 p.
- Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г.* Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 2006. 527 с.
- Богданов Ю.А., Леин А.Ю., Лисицын А.П.* Полиметаллические руды в рифтах Срединно-Атлантического хребта (15–40° с.ш.): минералогия, геохимия, генезис. М.: ГЕОС, 2015. 256 с.

### Список наиболее значимых работ А.П. Лисицына

- Лисицын А.П.* Распределение и состав взвеси из вод Индийского океана. Сообщение 1. Количественное распределение // *Океанологические исследования*. 1960. № 2. С. 71–85.
- Лисицын А.П.* Распределение и состав взвеси из вод Индийского океана. Сообщение 2. Гранулометрический состав взвеси // *Океанологические исследования*. 1961. № 3. С. 52–89.
- Лисицын А.П.* Распределение и состав взвеси из вод Индийского океана. Сообщение 3. Сопоставление гранулометрического состава взвеси и донных осадков // *Океанологические исследования*. 1962. № 5. С. 130–139.
- Лисицын А.П.* Вклад эндогенного вещества в океанскую седиментацию // *Литология на новом этапе развития геологических знаний*. М.: Наука, 1981. С. 20–45.
- Лисицын А.П.* Гидротермальные системы Мирового океана. Поставка эндогенного вещества // *Гидротермальные системы и осадочные формации Срединно-океанических хребтов Атлантики*. М.: Наука, 1993. С. 147–245.
- Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–743.
- Лисицын А.П.* Литология литосферных плит // *Геология и геофизика*, 2001. Т. 42. № 4. С. 522–599.
- Лисицын А.П.* Нерешенные проблемы океанологии Арктики // *Опыт системных океанологических исследований в Арктике*. М.: Научный мир, 2001. С. 31–74.
- Лисицын А.П.* Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли // *Глобальные изменения природной среды*. Новосибирск: ГЕО, 2001. С. 163–249.
- Лисицын А.П.* Новые возможности четырехмерной океанологии и мониторинга второго поколения – опыт двухлетних исследований на Белом море // *Актуальные проблемы океанологии*. М.: Наука, 2003. С. 503–556.
- Лисицын А.П.* Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы Мирового океана // *Геология и геофизика*. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
- Лисицын А.П.* Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // *Мировой океан*. Т. 2. М.: Научный мир, 2014. С. 331–553.

### Литература

- Безруков П.Л., Лисицын А.П.* Классификация осадков современных морских водоемов // *Геологические исследования в дальневосточных морях*. Труды Института океанологии. 1960. Т. 32. С. 4–14.
- Безрукова Е.М., Лисицын А.П., Мурдмаа И.О.* Пантелеймон Леонидович Безруков (1909–1981). М.: Наука, 1983. 192 с.
- Елина О.Ю.* У истоков российской селекции и семеноводства. Петр Иванович Лисицын на Шатиловской опытной станции и Госсемкультуре. М.: Наука, 2017. 260 с.
- Лисицын А.П.* Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 1. С. 18–60.
- Лисицын А.П., Петелин В.П.* К методике предварительной обработки проб морских осадков в судовых условиях // *Труды Института океанологии*. 1956. Т. 19. С. 240–251.

## TO THE 95TH ANNIVERSARY OF ALEXANDER PETROVICH LISITZIN

**N.V. Politova, L.L. Demina, V.P. Shevchenko**

*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, 117997, Russia*  
*e-mail: politova@ocean.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

Academician Alexander Lisitzin is an outstanding Soviet and Russian marine geologist, one of founders of marine geology in Russia, whose scientific works in the area of processes of modern sedimentation and ore-genesis are well known widely and noted by the state and international awards and prizes. New scientific directions in the field of marine geology are developed by him: doctrine of the role of suspended particulate matter in ocean sedimentation and biodifferentiation of particulate matter in the ocean, of zonal type of biogenic, avalanche, ice and arid sedimentation, of the ocean geological history and paleoceanology, of marginal ocean filters, of regularities of hydrothermal ore genesis.

**Keywords:** Lisitzin A.P., marine geology, processes of modern sedimentation, paleoceanology, marginal filters

### **Monographs of A.P. Lisitzin:**

- Lisitzin A.P.* Donnye otlozheniya Beringogo morya (Bottom sediments of the Bering Sea), *Trudy Instit. Oceanol.*, 1959, Vol. 29.
- Lisitzin A.P.* Raspreделение I khimicheskii sostav vzvesi v vodakh Indijskogo okeana (Distribution and chemical composition of the suspended matter in the waters of the Indian Ocean). Moscow: Nauka, 1964 (Okeanologiya MGG, No. 10), 136 p.
- Lisitsyn A.P.* Protsessy sovremennogo osadkoobrazovaniya v Beringovom more (Processes of recent sedimentation in the Bering Sea), Moscow: Nauka, 1966, 574 p.
- Lisitzin A.P. and Bogoyavlenskii A.N.* Geokhimiya kremnezema (Geochemistry of the silica), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1966.
- Lisitzin A.P.* Processes of recent sedimentation in the Bering Sea, Academic Press, 1969.
- Lisitzin A.P.* Sedimentation in the World Ocean, International Society of Ecology, Paleoceanology and Mineralogy, Special publication, No. 17, 1972, 218 p.
- Lisitzin A.P.* Osadkoobrazovanie v okeanakh (Sediment formation in the oceans), Moscow: Nauka, 1974, 438 p.
- Lisitzin A.P.* Protsessy okeanskoi sedimentatsii (Processes of the oceanic sedimentation). Moscow: Nauka, 1978, 392 p.
- Lisitzin A.P., Gurvich E.G., Lukashin V.N., Emel'yanov E.M., Zverinskaya I.B., and Kurinov A.D.* Geokhimiya elementov-gidrolizatov (Geochemistry of the elements-hydrolysates), Moscow: Nauka, 1980, 239 p.
- Lisitzin A.P.* Protsessy okeanskoi sedimentatsii (Processes of the oceanic sedimentation), 1984, 371 p. (in Japanese).
- Lisitzin A.P.* Lavinnaya sedimentatsiya i pereryvy v osadkoobrazovanii v moryakh i okeanakh (Avalanche sedimentation and the hiatuses in the seas and the oceans), Moscow: Nauka, 1988, 310 p.
- Lisitzin A.P.* Protsessy terrigennoi sedimentatsii v moryakh i okeanakh (Processes of terrigenous sedimentation in the seas and the oceans), Moscow: Nauka, 1991, 270 p.
- Lisitzin A.P.* Ledovaya sedimentatsiya v Mirovom okeane (Ice sedimentation in the World Ocean), Moscow: Nauka, 1994, 450 p.

- Lisitzin A.P.* Oceanic sedimentation: lithology and geochemistry, Washington: American Geophysical Union, 1996, 390 p.
- Lisitzin A.P.* Sea-ice and iceberg sedimentation in the World Ocean: present and past, Springer Verlag, 2002, 563 p.
- Bogdanov Yu.A., Lisitzin A.P., Sagalevich A.M., and Gurvich E.G.* Gidrotermal'nyi rudogenez okeanskogo dna (Hydrothermal ore genesis of the oceanic bottom), Moscow: Nauka, 2006, 527 p.
- Bogdanov Yu.A., Lein A.Yu., and Lisitzin A.P.* Polimetallicheskie rudy v riftakh Sredinno-Atlanticheskogo khrebtta (15–40° N): mineralogiya, geokhimiya, genesis (Polymetallic ores in the rifts of the Middle-Atlantic Ridges (15–40° N): mineralogy, geochemistry, genesis), Moscow: GEOS, 2015, 256 p.

### The main scientific works of A.P. Lisitzin

- Lisitzin A.P.* Raspređenje i sostav vzvesi iz vod Indiiskogo okeana. Soobshchenie 1. Kolichestvennoe raspređenje (Distribution and composition of the suspended particulate matter in the waters of the Indian Ocean. Part 1. Quantitative distribution), *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1960, No. 2, pp. 71–85.
- Lisitzin A.P.* Raspređenje i sostav vzvesi iz vod Indiiskogo okeana. Soobshchenie 2. Granulometricheskii sostav vzvesi (Distribution and composition of the suspended particulate matter in the waters of the Indian Ocean. Part 2. Granulometric composition of the suspended particulate matter), *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1961, No. 3, pp. 52–89.
- Lisitzin A.P.* Raspređenje i sostav vzvesi iz vod Indiiskogo okeana. Soobshchenie 3. Sopostavlenie granulometricheskogo sostava vzvesi i donnykh osadkov (Distribution and composition of the suspended particulate matter in the waters of the Indian Ocean. Part 3. Comparison of the granulometric composition of the suspended particulate matter and the bottom sediments), *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1962, No. 5, pp. 130–139.
- Lisitzin A.P.* Vklad endogenogo veshchestva v okeanskuyu sedimentatsiyu (Contribution of the endogenous matter into the oceanic sedimentation), In: Litologiya na novom etape razvitiya geologicheskikh znaniy (Lithology on the new stage of the geological knowledge' development), Moscow: Nauka, 1981, pp. 20–45.
- Lisitzin A.P.* Gidrotermal'nye sistemy Mirovogo okeana. Postavka endogenogo veshchestva (Hydrothermal systems of the World Ocean. Delivery of the endogenous matter), In: Gidrotermal'nye sistemy i osadochnye formatsii Sredinno-okeanicheskikh khrebtov Atlantiki (Hydrothermal systems and sedimentary formations of the Middle-Oceanic ridges of the Atlantic Ocean), Moscow: Nauka, 1993, pp. 147–245.
- Lisitzin A.P.* Marginal'nyi fil'tr okeanov (Marginal filters of the oceans), *Okeanologiya*, 1994, Vol. 34, No. 5, pp. 735–743.
- Lisitsyn A.P.* Lithology of lithospheric plates, *Russian geology and geophysics*, 2001, Vol. 42, No. 4, pp. 494–531.
- Lisitzin A.P.* Nereshennye problemy okeanologii Arktiki (Unsolved problems of the Arctic oceanology), In: Opyt sistemnykh okeanologicheskikh issledovaniy v Arktike (Experience of system oceanologic studies in the Arctic), Moscow: Nauchnyi mir, 2001, pp. 31–74.
- Lisitzin A.P.* Potoki veshchestva i energii vo vneshnikh i vnutrennikh sferakh Zemli (Fluxes of the matter and the energy in the external and internal Earth' spheres), In: Global'nye izmeneniya prirodnoi sredy (Global changes of the natural environment), Novosibirsk: GEO, 2001, pp. 163–249.

- Lisitzin A.P.* Novye vozmozhnosti chetyrekhmernoi okeanologii i monitoringa vtorogo pokoleniya – opyt dvukhletnikh issledovaniy na Belom more (The new scope of the four-dimensional oceanology and monitoring of the second generation: the two-year experience in studies of the White Sea), In: Aktual'nye problemy okeanologii (Actual problems of oceanology), Moscow: Nauka, 2003, pp. 503–556.
- Lisitzin A.P.* Sediment fluxes, natural filtering, and sedimentary systems of a «living ocean», *Russian geology and geophysics*, 2004, Vol. 45, No. 1, pp. 15–48.
- Lisitzin A.P.* Sovremennye predstavleniya ob osadkoobrazovanii v okeanakh i moryakh. Okean kak prirodnyi samopisets vzaimodeistviya geosfer Zemli (Modern conceptions on sediment formation in oceans and seas. Ocean as a natural recorder of geospheres' interaction), In: Mirovoi ocean, (World Ocean), Vol. 2. Moscow: Nauchnyi mir, 2014, pp. 331–553.

### References

- Bezrukov P.L. and Lisitzin A.P.* Klassifikatsiya osadkov sovremennykh morskikh vodoemov (Classification of the bottom sediments in the modern water basins), *Geologicheskie issledovaniya v dal'nevostochnykh moryakh, Trudy Instituta okeanologii*, 1960, Vol. 32, pp. 4–14.
- Bezrukova E.M., Lisitzin A.P., and Murdmaa I.O.* Panteleimon Leonidovich Bezrukov (1909–1981), Moscow: Nauka, 1983, 192 p.
- Elina O. Yu.* U istokov rossiiskoi selektsii i semenovodstva. Petr Ivanovich Lisitzin na Shatilovskoi opytnoi stantsii i Gossemkul'ture (The roots of plant breeding and seed culture in Russia: Pyotr Ivanovich Lisitsin at the Shatilov agricultural experiment station and Gossemkul'tura), Moscow: Nauka, 2017, 260 p.
- Lisitzin A.P.* Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes, *Russian geology and geophysics*, 2010, Vol. 51, No. 1, pp. 12–47.
- Lisitzin A.P. and Petelin V.P.* K metodike predvaritel'noi obrabotki prob morskikh osadkov v sudovykh usloviyakh (On the methodology of preliminary processing of the bottom sediment' samples onboard), *Trudy Instituta okeanologii*, 1956, Vol. 19, pp. 240–251.

## УЧЕНЫЙ ИЗОБРЕТАТЕЛЬ ПЭВМ «ОКЕАН-240», ЯХТЕННЫЙ КАПИТАН ДМИТРИЙ ТИЛИНИН

С.А. Свиридов, Н.Д. Тилинина

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: svi@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 10.04.2018, одобрена к печати 10.09.2018

Излагается краткая биография старшего научного сотрудника Института океанологии – Д.А. Тилинина, одного из первых в СССР разработчиков прикладной персональной ЭВМ, создателя информационно-измерительных комплексов для гидрофизических исследований, гидроакустических донных станций, акустических буев, успешно сочетавшего в себе активную научно-техническую деятельность в области акустических методов исследования океана со своим увлечением всей жизни – парусным спортом. Ставший яхтенным капитаном неограниченного района плавания, Д.А. Тилинин еще студентом выполнил норму мастера спорта по парусным видам. Это история человека, под руководством которого и при его личном участии в середине 90-х годов в Институте океанологии был создан один из первых узлов связи с доступом в сеть Интернет, тем самым обеспечивший ученым Института современный уровень коммуникаций с международным сообществом.

**Ключевые слова:** Микро-ЭВМ «Океан-240», «Океан – 240.2», СТД зонд с флюориметром, акустические измерения с борта парусной яхты

Дмитрий Алексеевич родился 29 апреля 1955 года в г. Москва в семье инженеров, мастеров спорта по парусному спорту. Его родители познакомились на всесоюзных парусных гонках как шкиперы женского и мужского экипажей. В 1972 г. после окончания специальной школы №22 с углубленным изучением английского языка он поступил в Московский физико-технический институт (государственный университет) на Факультет радиотехники и кибернетики. Еще в студенческие годы увлекся парусным спортом, в 1974 г. получил разряд кандидата в мастера спорта, а позднее, по окончании МФТИ, стал мастером спорта по парусному спорту.



Фото 1. Д.А. Тилинин, 1955 – 2018 гг.

После окончания МФТИ вся дальнейшая жизнь Дмитрия Алексеевича была связана с морем и микропроцессорами. В 1979 г. по приглашению академика Л.М. Бреховских и Б.Ф. Шехватова Дмитрий Алексеевич пришел работать в Отдел экспериментальных методов исследований Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР. Почти 40 лет он отдал Институту океанологии, работая в нескольких научных подразделениях, пройдя путь от стажера-исследователя в 1979 г. до старшего научного сотрудника в 1993 г.: в Отделе экспериментальных методов исследований, Лаборатории шумов и флуктуаций звука в океане и в Лаборатории океанологических измерений. В Институте океанологии Дмитрий Алексеевич занимался разработкой измерительных комплексов для донных станций. В 1982 г. им была выполнена разработка оригинальной прикладной Микро-ЭВМ «Океан-240», опубликованная в научном журнале «Микропроцессорные средства и системы» (Тилинин Д.А., 1986а), а затем результатом продолжения этих работ стала усовершенствованная персональная ЭВМ «Океан-240.2» на базе отечественного процессора К580ВМ80, основные принципы, построения которых были опубликованы в четвертом номере того же журнала (Тилинин Д.А. и др. 1986б). Структурная схема ПЭВМ представлена на фото 2.

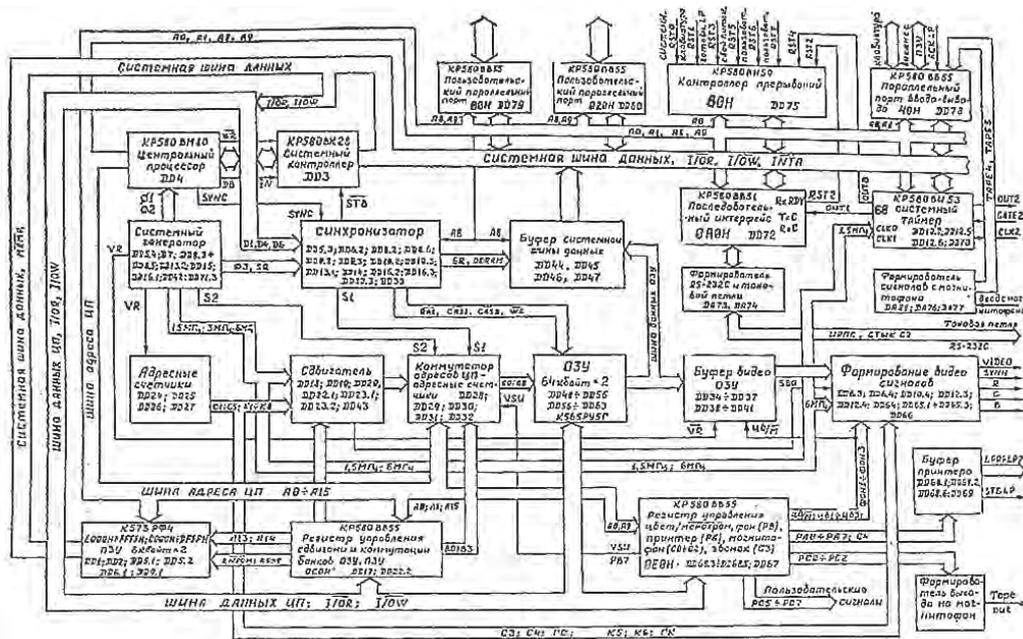


Фото 2. Структурная схема ПЭВМ «Океан 240», восстановлена по материалам публикации в МСС. 1986. № 4. С. 69–78

На обороте обложки второго номера журнала был размещен анонс его публикации, где было отмечено: «Персональная ЭВМ «Океан 240» отличается высокой надежностью, относительно низким энергопотреблением (около 7Вт), малыми габаритами. Программное обеспечение ПЭВМ «Океан 240» состоит из резидентного монитора, обеспечивающего интерфейс с графическим дисплеем и устройствами ввода-вывода: последовательной линией RS232-C, печатающим устройством типа УВВПЧ-30-004, кассетным магнитофоном, алфавитно-цифровой

клавиатурой, совместимой с ОС CP/M-80, использующей 64К байт ОЗУ в качестве «электронного диска»». Особо отмечена область применения персональной ЭВМ – для экспресс-обработки данных гидрологического зондирования. Сегодня эти успехи кажутся обыденными результатами, но в то время ситуация с ПК ЭВМ была совершенно другая, в продаже они появились во второй половине 80-х годов. Как выяснилось позднее, Д.А. Тилинин был одним из пионеров в СССР, кто создал действующий отечественный прикладной персональный компьютер для научных исследований, и который в дальнейшем был использован для разработки другого ПК – его клона – «Автограф-01» (Трушкин В., 2016а). Изучая сейчас публикации тех лет, хорошо видно, насколько была продумана и доведена до практического применения эта оригинальная научная разработка Д.А. Тилинина, в какой-то мере, недооценённая у нас в Институте океанологии. В общем, это объяснимо высокой технической специализацией этой работы в области микропроцессоров, что, конечно, было не свойственно для восприятия в мореведческой организации, ориентированной на географические и физико-математические направления исследований. К нашему удивлению, спустя много лет, эта работа всплыла из забвения. В 2017 г. в Институт океанологии поступил запрос от историка Владимира Трушкина, написавшего ряд статей для Википедии и Виртуального компьютерного музея (Трушкин В., 2016а, б). Одна из его работ – большая статья о советских ПК, которая также была опубликована в печатном сборнике (Трушкин В., 2017), куда попал небольшой материал о ПК «Океан-240». Владимир Трушкин прислал в наш Институт запрос с просьбой помочь найти автора и информацию о создании в ИО РАН ПК «Океан-240». Это произошло за восемь месяцев до ухода из жизни Д.А. Тилинина, их контакт тогда состоялся.

В 1987–1991 гг. Дмитрий Алексеевич под руководством Б.Г. Мордвинова принимал активное участие в проведении испытаний научного оборудования, установленного на акустических судах Института океанологии НИС «Академик Сергей



Фото 3. Подготовка ПМБ «Академик Иоффе» к спуску на воду.  
Команда во главе с Б.Г. Мордвиновым

Вавилов» и НИС «Академик Иоффе», разрабатывал аппаратуру и новую методику акустических измерений с борта парусной яхты – парусно-моторного бота «Академик Иоффе» (Фото 3). Эта методика была использована при оснащении строящихся в Финляндии научных судов для проведения акустических измерений в режиме тишины.



Фото 4. Балтика, 1991 год, ходовые испытания парусно-моторного бота (яхты) «Академик Иоффе», Слева направо: Д.А. Тилинин, Б.Г. Мордвинов, С.А. Свиридов

На фото 4 один из таких моментов в Балтийском море на ПМБ «Академик Иоффе». По результатам этой работы Дмитрием Алексеевичем было получено авторское свидетельство на изобретение.

В 90-е годы Дмитрий Алексеевич занимался разработкой информационно-измерительных комплексов для гидрофизических исследований, в том числе для гидроакустических донных станций. Выполнял ряд важных работ по пассивной акустической томографии донных осадков с передачей по радио каналу данных от многоканальной акустической антенны, свободно дрейфующего поверхностного буй-вехи.

С начала 2000-х годов Дмитрий Алексеевич выполнял ряд проектов РФФИ, а также работы по совместной с ГОИН тематике исследований – гидродинамика прибрежной зоны в Голубой бухте г. Геленджика, руководил разработкой, изготовлением и обработкой информации микропроцессорных волнографов-мареографов для прибрежных экспедиций на Аральском море.

Фото 5. Свободно дрейфующий поверхностный буй – веха гидроакустического комплекса, предназначен для решения широкого спектра задач оперативной океанологии, осуществляющий сбор, накопление и передачу океанографических данных по спутниковым каналам связи в режиме реального времени



Последние годы жизни, будучи тяжело больным, Дмитрий Алексеевич не бросал свою работу, он создал домашнюю лабораторию, поскольку мог работать

в основном у себя дома – сложно было отделить его работу от его жизни. За счет своих собственных средств создал специализированную лабораторию, проложил в провинциальный сельский дом в Московской области высокоскоростной канал связи Интернет. Его дом в Подмоскowie, куда он вынужден был перебраться на постоянное местожительство, всегда был заполнен аппаратурой. Осциллограф, паяльник, токарный станок, многочисленные микросхемы, Интернет-оборудование, детали корпуса морского буя – все это было дома, где он занимался своим любимым делом – разработкой современных автономных морских буюв, которые позволяют регистрировать, накапливать и передавать океанографические данные по каналам связи в режиме реального времени. К разработке он подходил комплексно и технологично, он приобрел и переоборудовал автофургон, на котором самостоятельно возил свою конструкцию в Южное отделение ИО РАН в г. Геленджик для проведения испытаний опытного образца буя. Один из таких буюв представлен на фото 5. Дмитрий Алексеевич был первым в ИО РАН, кто разработал математическое обеспечение для передачи данных в Интернет по спутниковому каналу связи с автономных донных гидроакустических станций. Он также принимал участие в разработке, изготовлении и метрологическом обеспечении автономных СТД зондов для подледных работ экспедиции ПАЛЭКС в 2010 г., участвовал в создании СТД зонда с флюориметром для программы исследований на Каспийском море по тематике академика Лисицына А.П. и многие другие работы.

Большинство коллег знали Дмитрия Алексеевича по работам в акустической лаборатории как высококвалифицированного специалиста в микропроцессорах. Но не только акустика и микропроцессоры были основным делом Дмитрия Алексеевича. Он обладал целым спектром интересов и увлечений, помимо акустики, микропроцессоров и парусного спорта. Параллельно с основной работой в 1994 г. он поступает и заканчивает курсы ЮНЕСКО по программе освоения работы в сети Интернет и создает хозрасчетный узел связи, организуя работу электронной почты для сотрудников Института океанологии. Эта работа перекликалась с той, которая выполнялась в Лаборатории оптики океана по созданию сети и формированию узла связи в рамках международной программы SeaWiFS и национальной программы по развитию информационных систем и баз данных (Свиридов С.А., 1994–1997). С этой даты началось наше сотрудничество в области ИТ-технологий. Именно в это время Дмитрий Алексеевич, понимая важность уникальных доменных имен, регистрирует домен *OCEAN.RU*. Поскольку узел связи Дмитрия Алексеевича был хозрасчетным, то домен был зарегистрирован на юридическое лицо – малое предприятие, которое обслуживало подразделения ИО РАН на хозрасчетной основе. Впоследствии, когда был создан Отдел информационных технологий, Дмитрий Алексеевич передал домен безвозмездно Институту океанологии. С этого момента, благодаря Дмитрию Алексеевичу, уникальное имя *OCEAN.RU* ассоциируется с нашим Институтом, ставшим фактически главной мореведческой структурой в виртуальном мире России. Надо отметить, что были неоднократные попытки заполнить этот домен со стороны третьих лиц и весьма влиятельных финансовых

организаций и банков, которые искушали его продать или переуступить права на этот домен. К этому домену сегодня привязана вся наша корпоративная почта, официальный сайт Института и еще более 20 других ресурсов. Портал *OCEAN.RU* постепенно стал не только всероссийским, но и международным ресурсом. В связи с этим важно знать, что имя Дмитрия Алексеевича Тилинина навсегда в нашей памяти и в истории Института будет связано с этим его бескорыстным шагом.

Его любовь к морю, парусному спорту и Интернет-технологиям однажды привели его к осуществлению мечты. В 2004 г. он принял участие в экспедиции парусного учебного судна «Надежда», где были проведены успешные испытания его разработки – спутниковой передачи данных в реальном времени – фото 6.



Фото 6. Парусник «Надежда»

Дмитрий Алексеевич относился к этой работе по-особенному, она была выполнена в рамках независимого экологического мониторинга подводного шума вблизи строительства новых морских платформ и трубопроводов на шельфе о. Сахалин в районе нагула серых китов под руководством заведующего лаборатории шумов и флуктуаций звука в океане А.В. Веденева.



Фото 7. Д.А. Тилинин с помощниками при подготовке к спуску и постановке измерительного буйа для экологического мониторинга в Охотском море, УС «Надежда», 2004 г., фото Буланова В.А.

На фото 7 рабочий момент экспедиции на УС «Надежда» в Охотском море, 2004 г. В этой работе тесно переплелись его любовь к морю, к его обитателям и высочайшая квалификация в области океанографических измерений. Дмитрий Алексеевич одержимо любил жизнь и море, работал и днем, и ночью. Трудно подсчитать во скольких экспедициях участвовал Дмитрий Алексеевич, некоторые малые экспедиции он организовывал сам и проводил их на парусной яхте, нагружая ее уникальными приборами или ходил под парусом с командой единомышленников для новых спортивных рекордов фото 8. Всего он участвовал в работе более 2-х десятков научных экспедиций, выступал на 12-ти научных конференциях и международных симпозиумах, им опубликовано 25 научных трудов.



Фото 8. Совместная Советско–финская спортивная регата 1991 г., команда ПМБ «Академик Иоффе», слева направо, первый ряд: Мордвинов Б.Г (капитан), Мг. Akhiomyaki, Свиридова С.А., Тилинин Д.А., второй ряд: Свиридов С.А., Шлемова Н.В., Шлемов М.Ю.

Вся жизнь Дмитрия Алексеевича была связана с морем, микропроцессорами, разработкой измерительных океанографических систем и Интернет-технологий. Море для талантливого ученого-изобретателя было его домом: мастер спорта по парусному спорту и яхтенный капитан, с трубкой за штурвалом, таким мы его запоем навсегда. Символично, что Дмитрий Алексеевич ушел от нас накануне Святой Пасхи, тихо и гордо, как говорят – с поднятым Андреевским флагом. Ушел из жизни глубоко увлеченный, целеустремленный, стойкий и мужественный моряк, профессионал высшей квалификации, готовый всегда протянуть руку помощи тем, кто находился рядом. Он пользовался авторитетом, уважением и признанием среди друзей и коллег по работе. Все, кто когда-либо работал с ним рядом, не забудут этого талантливого человека. Светлая память об этом замечательном человеке навсегда сохранится в сердцах тех, кому довелось его знать.

В заключение хочется выразить благодарность А.И. Веденеву за отзывы и рассказы о работе Дмитрия Алексеевича по проекту экологического мониторинга подводного шума на шельфе о. Сахалин и В.И. Буланову за фотографии, сделанные в Сахалинской экспедиции 2004 г.

## Литература

- Тилинин Д.А. Персональная ЭВМ «Океан 240» // Микропроцессорные средства и системы. 1986. № 2. С. 24–25.
- Тилинин Д.А., Глазачев Н.К., Айсанов Р.Б. Персональная ЭВМ «Океан 240.2» // Микропроцессорные средства и системы. 1986. № 4. С. 69–78.
- Трушкин В. Советские домашние компьютеры 1980-х: краткая история. Часть 1 // «История отечественной вычислительной техники / Персональные ЭВМ». Обзор советских ПК. 2016. <http://www.computer-museum.ru/search/?tags=&q=%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80+%D0%A2%D1%80%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B8%D0%BD&how=r&from=&to=> (дата обращения: 10.10.2018).
- Трушкин В. ПК второй половины 1980-х годов. Часть II // «История отечественной вычислительной техники / Персональные ЭВМ». Обзор советских ПК. 2016. <http://www.computer-museum.ru/search/?tags=&q=%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80+%D0%A2%D1%80%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B8%D0%BD&how=r&from=&to=> (дата обращения: 10.10.2018).
- Советские ПК. <http://zx-pk.ru/threads/27951-quot-avtograf-01-quot.html> (дата обращения: 10.10.2018).
- Свиридов С.А. Создание сетевого центра и Отдела информационных технологий 1994–1997. <https://ocean.ru/index.php/scientific-and-auxiliary-units/department-of-information-technologies/item/566-sviridov-sergej-aleksandrovich> (дата обращения: 10.10.2018).
- Трушкин В. Советские домашние компьютеры 1980-х: краткая история // В сб. Страницы истории отечественных ИТ / Сост. Э.М. Пройдаков. М.: Альпина Паблишер, 2017. Т. 3. 240 с.
- Виртуальный компьютерный музей // <http://www.computer-museum.ru/> (дата обращения: 10.10.2018).

## SCIENTIST INVENTOR OF THE PC «OCEAN-240», YACHT CAPTAIN DMITRY TILININ

**S.A. Sviridov, N.D. Tilinina**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: svi@ocean.ru*

Submitted 10.04.2018, accepted 10.09.2018

A brief biography of Dmitry Tilinin a senior researcher at the Institute of Oceanology is given. He was one of the first in the USSR developers of an applied personal computer, the creator of information and measurement systems for hydrophysical studies, hydroacoustic bottom stations, acoustic buoys, successfully combining active scientific and technical activity in the field of acoustic methods of studying the ocean with his lifelong hobby - sailing sport. He was the yacht captain of the unlimited navigation area, master of sports in sailing species. This is the history of man, under whose leadership and with his personal participation in the mid-90s, one of the first communication centers with Internet access was created at the Institute of Oceanology, thereby providing the Institute with modern level of communication with the international community.

**Keywords:** Micro-computer «Ocean-240», «Ocean-240.2», STD probe with fluorimeter, acoustic measurements from a sailing yacht

### References

- Tilinin D.A.* Personal'naya EHVM «Okean 240» (Personal computer «Ocean 240»). *Mikroprocessornye sredstva i sistemy (Microprocessor means and systems)*, 1986, No. 2, pp. 24–25.
- Tilinin D.A., Glazachev N.K., and Ajsanov R.B.* Personal'naya EHVM «Okean 240.2» (Personal computer «Ocean 240.2»). *Mikroprocessornye sredstva i sistemy (Microprocessor means and systems)*, 1986, No. 4, pp. 69–78.
- Trushkin V.* Sovetskie domashnie komp'yutery 1980-h: kratkaya istoriya. CHast' 1 (Soviet home computers of the 1980s: A brief history. Part I). «Istoriya otechestvennoj vychislitel'noj tekhniki, Personal'nye EHVM». *Obzor sovetskih PK («The history of domestic computing technology / Personal computers».* Overview of the Soviet PC), 2016, <http://www.computer-museum.ru/search/?tags=&q=%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80+%D0%A2%D1%80%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B8%D0%BD&how=r&from=&to=> (last accessed in 10.10.2018)
- Trushkin V.* PK vtoroj poloviny 1980-h godov. CHast' II *Obzor sovetskih PK (PC of the second half of the 1980s. Part II), «Istoriya otechestvennoj vychislitel'noj tekhniki, Personal'nye EHVM», («History of domestic computing technology, Personal computers».* Overview of the Soviet PC), 2016. <http://www.computer-museum.ru/search/?tags=&q=%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80+%D0%A2%D1%80%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B8%D0%BD&how=r&from=&to=> (last accessed in 10.10.2018).
- Sovetskie PK (Soviet PC). <http://zx-pk.ru/threads/27951-quot-avtograf-01-quot.html> (last accessed in 10.10.2018).
- Sviridov S.A.* Sozдание setevogo centra i Otdela informacionnyh tekhnologij 1994–1997 (Creation of the Network Center and the IT Department of Shirshov Institute of oceanology, 1994–1997). <https://ocean.ru/index.php/scientific-and-auxiliary-units/department-of-information-technologies/item/566-sviridov-sergej-aleksandrovich> (last accessed in 10.10.2018).
- Trushkin V.* Sovetskie domashnie komp'yutery 1980-h: kratkaya istoriya. V sb. *Stranicy istorii otechestvennyh IT, Add. by E.H.M. Projdakov (Soviet home computers of the 1980s: a brief history, Proc. Pages of the history of domestic IT, Add. by E.H.M. Projdakov.)*, Moscow: Al'pina Publisher, 2017, Vol. 3, 240 p.
- Virtual'nyj komp'yuternyj muzej (Virtual Computer Museum), <http://www.computer-museum.ru/> (last accessed in 10.10.2018).

## ИТОГИ XVI ШКОЛЫ-СЕМИНАРА ИМЕНИ АКАДЕМИКА Л.М. БРЕХОВСКИХ «АКУСТИКА ОКЕАНА»

**В.В. Гончаров, А.Г. Островский, С.А. Свиридов,  
А.Н. Серебряный, Е.Е. Химченко, Т.И. Цыплакова**

*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 01.06.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Сообщение о XVI Школе-семинаре имени академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», прошедшем в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН с 29 мая по 1 июня 2018 г. В основные задачи школы-семинара входило представление и обсуждение новых результатов, достижений, приоритетов и современной проблематики российских исследований в области акустики океана. Более 150 участников представляли Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва), Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (Владивосток), Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (Москва), Институт прикладной физики РАН (Нижний Новгород), Акустический институт им. Н.Н. Андреева (Москва), а также Севастопольский государственный университет (Севастополь), МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва) и другие организации. 87 докладов были опубликованы в Сборнике трудов «Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXXI сессией Российского Акустического Общества / Под ред. В.В. Гончарова, Т.И. Цыплаковой. М.: ГЕОС, 2018, 436 с. ISBN 978 5-89118-768-9» и размещены на официальном сайте Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН: <https://ocean.ru/index.php/arkhiv-dokumentatsii/category/29-16-ocean-ac?download=306:doklady>.

**Ключевые слова:** Школа-семинар им. Л.М. Бреховских, акустика океана, Российское Акустическое Общество (РАО), рассеяние звука, распространение звуковых волн в слоистых средах

В Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН в период с 29 мая по 1 июня 2018 г. была проведена XVI школа-семинар имени академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенная с XXXI сессией Российского Акустического Общества (РАО).

Школа-семинар имени академика Л.М. Бреховских является одной из самых представительных конференций по подводной акустике в России. Доклады школы были изданы в традиционном формате в Сборнике трудов под редакцией В.В. Гончарова и Т.И. Цыплаковой (Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», 2018): <https://ocean.ru/index.php/arkhiv-dokumentatsii/category/29-16-ocean-ac?download=306:doklady>. Часть статей по материалам докладов опубликованы в настоящем выпуске журнала «Океанологические исследования», еще несколько работ проходят оформление и готовятся к публикации в других выпусках журнала.



Тематика Школы-семинара «Акустика океана» традиционно касалась четырех основных направлений: распространение звука в океане, рассеяние и отражение звука, акустическая океанология, технические средства и обработка сигналов.

На секцию «Распространение звука» был представлен 21 доклад. В работах были изложены результаты натуральных и численных экспериментов по распространению звуковых сигналов от различных источников, прежде всего в шельфовой зоне, т.е. в мелком море. Были представлены новые алгоритмы численного моделирования звуковых полей в сложных средах (атмосфера, океан и земная кора). Особое внимание было уделено результатам натуральных экспериментов на шельфе Охотского, Японского, Черного и других морей, а также распространению звука на арктическом шельфе. Активно обсуждался доклад, посвященный измерению и моделированию импульсного акустического поля, формируемого на шельфе забивкой свай на берегу, для оценки уровня акустического облучения наблюдаемого с берега серого кита. Также рассматривались особенности распространения сигналов на шельфе с возрастающим дном, пространственно-временная когерентность звуковых полей акваторий, фокусировка звука и его затухание, горизонтальная рефракция. Обсуждались различные особенности распространения звука вдоль границ сред. С большим вниманием участники слушали доклад о распространении импульсного сигнала в атмосфере, океане и земной коре от источника звука в атмосфере. Заинтересовали также доклады по построению 3-D модельных геоакустических волноводов по результатам экспериментально-теоретических исследований потерь при распространении звука на шельфе.

На секции «Рассеяние и отражение звука» было заслушано 17 докладов, посвященных исследованию рассеяния звука на биологических объектах, поверхностной и донной дальней реверберации в мелком море, методам их измерения и оценки и возможностей использования для мониторинга подводной среды. Во время сессии обсуждались процессы обратного рассеяния и дальней реверберации в мелком море, вопрос о качестве восстановления координат источника звука численным методом временного обращения волн в зависимости от поглощающих свойств дна. Были представлены доклады о взаимосвязи рассеяния звука и распределения зоопланктона в верхнем слое океана, а также рассматривался вопрос о расчете временных рядов импульсных акустических сигналов в мелком море с проницаемым дном в рамках лучевой теории. Немалый интерес вызвал доклад «Интерференционная структура низкочастотной донной реверберации в неоднородном мелководном волноводе». Большое внимание уделялось исследованию отражающих свойств дна в зависимости от структуры его верхних осадочных слоев (пониженная скорость звука, поглощение, газонасыщенность и др.).

В разделе «Акустическая океанология» было представлено 26 докладов, посвященных акустическим методам и средствам исследования океана (включая акустическую томографию и мониторинг), океанологическим характеристикам, важным для подводной акустики, экологическим аспектам и шумам моря. Часть

докладов посвящена исследованиям морской среды с помощью акустической томографии, как активной, так и пассивной (шумовой) с развитием нелинейных схем. Были сделаны доклады, посвященные наблюдениям внутренних волн на шельфе морей. Неподдельный интерес вызвали доклады, посвященные акустической коммуникации дельфинов и измерениям шумов судна на воздушной подушке с целью оценки антропогенного воздействия шума на орнито- и ихтиофауну. В рамках сессии были представлены доклады, посвященные исследованиям морской среды с помощью акустической томографии, а также о возможности восстановления профиля скорости звука в мелком море по данным волноводной дисперсии. Отдельный интерес представляли работы по акустическим характеристикам морских осадков.

В раздел «Технические средства и обработка сигналов» вошло 23 доклада, в которых были представлены результаты разработки и морских испытаний новых технических средств (буксируемой векторно-скалярной антенны, мобильных аппаратно-программных комплексов, аппаратуры донных станций, акустической связи с ними и др.). В рамках сессии были представлены новые оптимальные методы обработки и анализа измеренных волновых полей, позволяющие решать различные задачи акустики океана. Большой интерес и последующую дискуссию вызвал доклад, посвященный возможности дистанционного контроля состояния и перемещения легководолазов по излучаемым ими подводным шумам, а также доклад о современных автономных подводных профилирующих аппаратах. Рассматривались вопросы разработки технологии исследования объектов культурного наследия, погребенных в донных неуплотненных осадках с привлечением новых технических средств.

На основании всех вышеперечисленных тематик можно составить представление о приоритетах в проблематике и современном уровне российских исследований в области акустики океана. Проведение XVI Школы-семинара имени акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» способствовало обмену новыми идеями между активно работающими группами исследователей.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010).

### **Благодарности**

Оргкомитет XVI Школы-семинара «Акустика океана» выражает свою благодарность РФФИ за финансовую поддержку по гранту № 18-05-20023, благодаря чему был опубликован том трудов конференции, который распространялся бесплатно среди участников, а также был разослан в ведущие библиотеки России. Третья часть докладов, представленных на Школе-семинаре, имела ссылку на поддержку грантов РФФИ.

### **Литература**

Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXXI сессией Российского Акустического Общества / Под ред. В.В. Гончарова,

Т.И. Цыплаковой. М.: ГЕОС, 2018, 436 с. ISBN 978 5-89118-768-9 <https://ocean.ru/index.php/arkhiv-dokumentatsii/category/29-16-ocean-ac?download=306:doklady> (дата обращения: 29.08.2018).

## SUMMARY OF THE XVI SCHOOL-SEMINAR «OCEAN ACOUSTICS» NAMED AFTER ACADEMICIAN L.M. BREKHOVSKIKH

**V.V. Goncharov, A.G. Ostrovskii, S.A. Sviridov,  
A.N. Serebryanyi, E.E. Khimchenko, T.I. Tsyplakova**

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

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

This short communication presents the report on the XVI School-seminar «Ocean Acoustics» named after academician L.M. Brekhovskikh. The conference combined with the XXXI session of the Russian Acoustic Society was held at Shirshov Institute of Oceanology, RAS in May 29 – June 1, 2018. The objectives of the conference were as follows: overview the ongoing research by Russian scientists in the field of ocean acoustics, present new results and exchange of opinions among members of the ocean acoustics community, discuss new priorities and future projects. The conference was attended by more than 150 participants from Shirshov Institute of Oceanology (Moscow), Ilyichev Pacific Oceanological Institute (Vladivostok), Prokhorov Institute of General Physics (Moscow), Institute of Applied Physics (Nizhniy Novgorod) and Andreev Acoustics Institute (Moscow), as well as from Sevastopol State University and Lomonosov Moscow State University. 87 reports were published in the volume Ocean Acoustics, Proceedings of the XVI L.M. Brekhovskikh Conference, Edited by V.V. Goncharov, T.I. Tsyplakova. Moscow: GEOS, 2018, 436 p. ISBN 978 5-89118-768-9.

**Keywords:** ocean, hydroacoustics, sound scattering, sound waves, layered media

### References

Ocean Acoustics. Proceedings of the 16-th L.M. Brekhovskikh's conference. Moscow, GEOS, 2018, 436 p. Ed. By V.V. Goncharov, T.I. Tsyplakova. ISBN 978 5-89118-768-9, Available at: <https://ocean.ru/index.php/arkhiv-dokumentatsii/category/29-16-ocean-ac?download=306:doklady> (date of request: 29.08.2018).

## Правила оформления статей в журнал «Океанологические исследования»

**Уважаемые авторы**, на рассмотрение для публикации в журнале «Океанологические исследования» принимаются оригинальные рукописи общим объемом (текст, рисунки, списки литературы и т.д.) не более 35 страниц для статей тематических разделов, для обзорных статей – не более 40 страниц, для кратких сообщений – не более 8 страниц. Правила подготовки и подачи материалов едины для всех рукописей и представлены на сайте журнала: <https://jor.ocean.ru/index.php/jor/navigationMenu/view/authors>. Каждая статья обязательно должна содержать краткую английскую часть, которая оформляется по аналогии с русской, оформление ссылок и списка литературы можно найти по ссылке. Список литературы должен предоставляться в двух видах – традиционном по ГОСТ Р 7.0.5 -2008 «Библиографическая ссылка» и в латинице, предлагается алгоритм «латинизации». Если для «латинизированной» статьи имеется ее опубликованный перевод тех же авторов, то эта ссылка в «латинизации» заменяется на ссылку переводной работы. Наличие ключевых слов обязательно. Это необходимо для правильного индексирования ссылок в РИНЦ и других системах.

Для подачи статьи в журнал необходимо зарегистрироваться на сайте журнала в личном кабинете, по ссылке: <https://jor.ocean.ru/index.php/jor/login> и подготовить следующие файлы, которые загрузить через интерактивное окно сайта журнала:

1. Файл текста статьи в формате совместимом с MS Word.
2. Файлы с рисунками, если имеются – каждый в отдельном графическом файле.
3. Если рисунки сложные, состоят из подрисунков (например 1а, 1б), можно прислать их части отдельно, при этом в файле pdf (см. п.4) необходимо показать такие рисунки в собранном виде.
4. Файл с подписями к рисункам, если они есть, в формате совместимом с MS Word.
5. Файл в формате pdf, в оформлении, как видят статью сами авторы, содержащий: текст статьи, рисунки и подписи к ним, вставленные в соответствующие места текста. Перед трансформацией текста из MS Word в формат pdf необходимо создать сквозную нумерацию строк текста, что существенным образом облегчает работу рецензентов. Для этого в редакторе MS Word необходимо нажать кнопку «Разметка страницы», затем «Номера строк» и выбрать опцию «Непрерывно». Убрать нумерацию строк можно выбрав опцию «Нет».
6. «Лицензионное соглашение» по форме, представленной на сайте: <https://jor.ocean.ru/index.php/jor/navigationMenu/view/authors>.
7. «Согласие авторов на публикацию» по форме, представленной также по вышеуказанной ссылке.
8. Рекомендательное письмо – для нерезидентов и экспертное заключение для резидентов.

Все файлы должны называться по фамилии первого автора на русском языке. Если у данного автора несколько статей, где он первый автор, то файлы надо называть по фамилии первого автора и первому слову из названия. Пример: Ivanovclimatology-text.doc, Ivanov-climatology-fig-1.tif, Ivanov-climatology-text.pdf и т.д.

### Оформление текста статьи

Текст статьи должен быть подготовлен в формате совместимом с MS Word и проверен с помощью Spell Checker.

Параметры форматирования страницы: размер бумаги – А4; ориентация – книжная; поля: верхнее и нижнее – 2 см; левое поле – 3 см; правое поле – 1,5 см. Структура файла текста статьи следующая:

1. Тематическая рубрика (код) – указывается согласно действующей номенклатуре специальностей научных работников (код УДК и/или ГРНТИ) – шрифт Times New Roman 12 обычный.
2. Название статьи – печатается строчными буквами, шрифтом Arial 14 полужирный, интервал одинарный, выравнивается по центру. Точка в конце не ставится. Сокращения, кроме общепринятых, не употребляются.
3. Фамилия и инициалы автора (-ов) печатаются шрифтом Times New Roman 12 полужирным.
4. Аффiliation – название организации, ее адрес, E-mail, телефон; оформляется шрифтом Times New Roman 12 курсив, интервал одинарный, указывается название, почтовый индекс, город, улица, дом, e-mail и телефон автора указывается через запятую после почтового адреса. Рекомендуется указывать корпоративные почтовые адреса и телефоны, предоставляемые организацией по месту работы первого автора.
5. Аннотация – печатается шрифтом Times New Roman 10, интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. Слово «Аннотация» не пишется. Перед аннотацией пропустить пустую строку. Объем не более 300 слов.
6. Ключевые слова оформляются шрифтом Times New Roman 10 обычный, интервал одинарный.
7. Текст статьи – основной текст печатается шрифтом Times New Roman 12 обычный, интервал полуторный, выравнивается по ширине. Каждый абзац начинается с красной строки. Отступ 1,25 см; Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, интервал одинарный, выравнивается по центру и отделяется от предыдущего раздела двумя пустыми строками и от последующего текста одной пустой строкой. Точка в конце не ставится. Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 курсив, интервал одинарный, выравнивается по центру и отделяется от предыдущего раздела двумя пустыми строками и от последующего текста одной пустой строкой. Нумерация разделов и подразделов по желанию автора. Точка в конце не ставится.
8. Список литературы – аналогичен п.7, авторы выделяются курсивом.
9. Название статьи на английском языке (Title in English).
10. Фамилия и инициалы автора (-ов) на английском языке (Author(s)) - сначала пишутся инициалы автора, затем фамилия, шрифт Times New Roman 12 полужирный, интервал одинарный, выравнивание по центру. Если все авторы статьи работают или учатся в одном учреждении, не надо указывать отдельно место работы каждого автора. Если авторы из разных организаций, после фамилий ставить 1, 2, 3 в виде верхнего индекса.
11. Аффiliation – название организации, ее адрес, E-mail, телефон на английском языке.
12. Аннотация на английском языке (Abstract) – формат аналогичный п. 5.
13. Ключевые слова на английском языке (Keywords) – формат аналогичный п.6.
14. Список литературы на латинице (References), авторы и периодические издания выделяются курсивом.

**Примечание:** Статья может быть опубликована в журнале после получения оригиналов: Лицензионного договора, «Согласия авторов на публикацию статьи» и экспертного заключения (авторы прикладывают сканированные копии этих документов через личный кабинет на сайте журнала, а оригиналы документов отправляют почтой в адрес редакции). Нерезиденты представляют рекомендательное письмо.

# JOURNAL OF OCEANOLOGICAL RESEARCH

**2018 Vol. 46 No. 2**

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 Nahimovskiy Prospekt, Moscow, 117997, Russia

Tel. +7 (495) 719-0035, ext. 03-03, e-mail: [jorboard@ocean.ru](mailto:jorboard@ocean.ru)

Редактор-корректор: **Ю.В. Воробьева** Editor-proofreader: **Yu.V. Vorobeva**  
Дизайн обложки и оформление: **Е.В. Сердцева** Cover design: **E.V. Serdtseva**

Фотография на обложке **Давида Люке**, Лаборатория океанографии Вильфранш-сюр-Мер, Франция  
Cover Photo by **David Luquet**, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche, France

Компьютерная подготовка оригинал-макета: **Е.В. Бучко**  
Computer preparation of the original layout: **E.V. Buchko**

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 **15.09.2018** г. Подписано к печати **18.10.2018** г. Формат бумаги 60×80 1/8  
Офсетная печать Усл. печ. л. 26.04 Уч. изд.л. 11.8  
Тираж 150 экз. Зак. № 134124 от 09.11.18

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



1989 год:

Научно-исследовательские суда «Академик Сергей Вавилов» (3-й рейс) и «Академик Иоффе» (1-й рейс) на швартовых в Рейкьявике после совместных работ и испытаний. Печатается по материала архива Акустического отдела ИО РАН.

**Уважаемые авторы,  
организаторы конференций и симпозиумов!**  
Редакция журнала «Океанологические исследования»  
оказывает информационно-технические  
и издательские услуги:

- оперативную публикацию трудов конференций и симпозиумов;
- издание монографий и тематических сборников;
- верстку научных работ, корректуру и литературное редактирование;
- художественный дизайн и оформление обложки издания;
- регистрацию публикаций в БД CrossRef и индексирование в РИНЦ;
- создание тематического сайта конференции, тематического издания и размещение опубликованных работ в сети Интернет;
- создание хранилища DOI для Вашей монографии или сборника трудов;
- упрощенный и быстрый процесс издания;
- Вы остаетесь обладателем авторских прав на Вашу работу.

**Адрес редакции:**

117997, Москва, Нахимовский проспект, 36, офис 203  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Редакция журнала «Океанологические исследования»



E-mail: [jorboard@ocean.ru](mailto:jorboard@ocean.ru)  
<http://www.jor.ocean.ru>  
тел.: +7 (495) 719-00-35