Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 35

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года
Выходит 4 раза в год

ISSN 2074-2762

РГГМУ

Санкт-Петербург
2014

УДК 3 + 502.52 + 55
ББК 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 35. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2014. – 204 с.

ISSN 2074-2762

В номере публикуются статьи сотрудников РГГМУ и приглашенных экспертов, работающих по программе Года Финского Залива, утвержденной Хельсинской Комиссией (ХЕЛКОМ). Статьи освещают различные аспекты изучения региона Балтийского моря, причем большая их часть посвящена Финскому заливу, его береговой зоне и впадающим в него водотокам.

Издание предназначено для ученых, исследующих геосистему Балтийского моря, специалистов в области пространственного планирования и оценки антропогенных воздействий на водные объекты, а также для студентов и аспирантов, обучающихся по перечисленным специальностям.

Редакционный совет:
Л.Н. Карлин, д-р физ.-мат. наук, проф., ректор РГГМУ, председатель;
Р.М. Вильфанд, д-р техн. наук, директор ГМНИЦ РФ; **А.И. Грабовский**, начальник Департамента Гос. Гидрометслужбы по СЗФО РФ; **Ю.В. Кулешов**, д-р физ.-мат. наук, проф., зам. Начальника Военно-инженерной академии им. Ф.М. Можайского; **В.А. Румянцев**, академик РАН, директор института Озероведения РАН; **М.П. Федоров**, академик РАН, научный руководитель программы НИУ СПб ГПУ; **И.Е. Фролов**, д-р техн. наук, профессор, директор ГНЦ ААНИИ; **Б. Шапрон**, д-р наук, ведущий ученый института морских исследований IFREMER (Франция).

Редакционная коллегия:
Главный редактор: **Л.Н. Карлин**, д-р физ.-мат. наук, проф.
Зам. главного редактора: **В.Н. Воробьев**, канд. геогр. наук.
Члены редколлегии: **Н.Б. Барышников**, д-р геогр. наук, проф.; **Л.П. Бескид**, д-р техн. наук, проф.; **М.Б. Шилин**, канд. биол. наук, д-р техн. наук, проф.; **И.Г. Максимова**, отв. секретарь; **Н.П. Смирнов**, д-р геогр. наук, проф.; **А.И. Угрюмов**, д-р геогр. наук, проф.; **И.П. Фирова**, д-р эконом. наук, проф.

ISSN 2074-2762

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному Федеральному округу.

Свидетельство ПИ № ФС2-8484 от 07.02.2007 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Подписной индекс 78576 в каталоге «Каталог российской прессы «Почта России».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки http://elibrary.ru

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции: Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
Тел.: (812) 444-81-55

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2014
© Авторы публикаций, 2014

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

FEDERAL STATE-FUNDED EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER VOCATIONAL EDUCATION
RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY

PROCEEDINGS

OF THE RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY

№ 35

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2074-2762

RSHU

St. Petersburg
2014

UDA 3 + 502.52 + 55
LBC 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. Issue 35. – St. Petersburg: RSHU Publishers, 2014. – 204 pp.

ISSN 2074-2762

Articles of the University associates and invited experts, who are working on the GoF-2014 program, accepted by the HELCOM, are published. In the articles are discussed different aspects of the investigation of the Baltic Region. The main part of articles is focusing on problems of the Gulf of Finland, its coastal zone and rivers of the catchment basin.

The journal is intended for scientists studying the geosystem of the Baltic sea, experts in marine spatial planning and environmental impact assessment, and PhD-students who are specialized in these fields of knowledge.

Editorial Board:
L.N. Karlin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Rector of RSHU, Chairman;
R.M. Vilfand, Doctor of Technical Sciences, Director of Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation; **A.I. Grabovsky**, Head of the North-Western Department of Roshydromet; **U.V. Kuleshov**, Doctor of Physics and Mathematics, deputy Head of Military Space Academy named after F.M. Mozhaisky; **V.A. Rumyantsev**, member of the Academy of Sciences, Director of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Science; **M.P. Fedorov**, member of the Academy of Sciences, research advisor of National Research University of St. Petersburg State Polytechnical University; **I.E. Frolov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of State Research Center «Arctic and Antarctic Reserch Institute»; **B. Chapron**, Doctor, Leading scientist of Institute for Marine Research IFREMER (France).

The Editorial Board:
Editor in Chief: **L.N. Karlin**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor.
Deputy Editor in Chief: **V.N. Vorobyev**, PhD. of Geographical Sciences.
Members of the Editorial Board: **N.B. Baryshnikov**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **P.P. Beskid**, Doctor of Engineering, Professor; **M.B. Shilin**, PhD. of Biological Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor; **I.G. Maximova**, executive secretary; **N.P. Smirnov**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **A.I. Ugryumov**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **I.P. Firova**, Doctor of Economics, Professor.

ISSN 2074-2762

The Journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, which should publish the main results of theses for the Doctor and Candidate of sciences degree.

The Journal is registered in the Russian Federal Surveillance Service for Compliance with the Law in Mass Communications and Cultural Heritage Protection in the North-western Federal District.

Certificate ПИ № ФС2-8484 of July 02, 2007.

Area of expertise: meteorology, hydrology, oceanology, geoecology, geophysics, social and human sciences.

Subscription index 78576 in «Catalogue of the Russian press «Post of Russia».

The Journal is included in the «Russian Science Citation Index» database (RSCI), based on the platform of the National Electronic Library (http://elibrary.ru).

Any use of this Journal in whole or in part, must include the customary bibliographic citation.

Editorial Board's point of view may not be concurrent with opinion of the authors.

Editorial Office address: 195196, Malookhtinsky Ave, 98, St. Petersburg, Russia
Tel.: +7 812 444-81-55

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2014
© Authors of publications, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Океанология

Шилин М.Б., Коузов С.А., Ланге Е.К., Литвинчук Л.Ф., Лукьянов С.В., Максимов А.А. Результаты комплексных экспедиционных исследований на акватории создаваемого государственного природного заповедника «Ингерманландский» 7

Владимирова О.М., Лукьянов С.В., Подрезова Н.А., Царев В.А. Особенности распространения придонных вод в центральной части Балтийского моря 31

Владимирова О.М., Царев В.А. Роль бароклинных течений в распространении североморских вод в Арконском бассейне 42

Веретенников В.Н. Разностная схема с неравномерной сеткой для расчета колебаний длинной волны в бухте 50

Морская биология

Чернова Н.В. Краткий обзор ихтиофауны Финского залива 55

Коузов С.А. Современное состояние сообществ водно-болотных птиц Лужской губы: гнездование, миграции и линька 71

Морская геология

Ковалева О.А., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Жамойда В.А., Нестерова Е.Н. Абразионные процессы южной береговой зоны Финского залива: причины, динамика, прогноз развития 87

Рябчук Д.В., Нестерова Е.Н., Жамойда В.А., Котилайнен А., Валлиус Г., Сухачева Л.Л., Спиридонов М.А. Динамика седиментационных процессов в Невской губе (Финский залив) под воздействием техногенных факторов 102

Дноуглубление и дреджинг

Корнеев О.Ю., Рыбалко А.Е., Федорова Н.К. Геоэкологические аспекты дреджинга в Финском заливе 119

Сухачева Л.Л. Экологические и другие аспекты дреджинга при реализации крупных инженерных проектов в восточной части Финского залива — обобщение данных многолетних аэрокосмических наблюдений 124

Погребов В.Б., Кийко О.А., Филиппов А.А. Оценка воздействия на окружающую среду и мониторинг биологических последствий дреджинга в Финском заливе Балтийского моря 133

Царькова Н.С. Технология моделирования процесса переноса взвешенных веществ водными течениями на примере результатов дноуглубительных работ в Лужской губе Финского залива 142

Пространственное планирование и управление береговой зоной

Кононенко М.Р., Марковец И.М., Подгайский Э.В. Подходы к морскому пространственному планированию в акватории Финского залива 151

Чусов А.Н., Шилин М.Б., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Тимошина А.В. Использование намытой береговой территории в Невской губе для строительства Лахта-Центра 156

Экология речных бассейнов

Кондратьев С.А., Максимов Д.А., Шмакова М.В., Уличев В.И. Моделирование биогенной нагрузки на водные объекты 165

Жигульский В.А., Шуйский В.Ф., Царькова Н.С., Соловей Н.А., Максимова Е.Ю. Реакция макрозообентоса водотоков бассейна восточной части Финского залива на многофакторные антропогенные воздействия 178

Альхименко А.И., Загрядская Н.Н., Калинин С.Г. Численное моделирование распространения взвесей при дноуглублении 186

Список авторов 199

Требования к представлению и оформлению рукописей для авторов журнала 201

CONTENTS

Oceanology

Shilin M.B., Kouzov S.A., Lange E.K., Litvinchuk L.F., Lukyanov S.V., Maksimov A.A. Results of the complex expedition research on the area of the planned State Nature Reserve «Ingermanlandskij». 7

Vladimirova O.M., Lukyanov S.V., Podrezova N.A., Tsaryov V.A. Features of bottom water spreadding in the central part of the Baltic Sea. 31

Vladimiriva O.M., Tsaryov V.A. Role of baroclinic currents in spreading of the North Sea waters in the Arkona Basin 42

Veretennikov V.N. Difference schemes with non-uniform grig for calculation of waves of wavelengths in cove 50

Marine Biology

Chernova N.V. Fish fauna of the Gulf of Finland, short review 55

Kouzov S.A. Current state of waterfowl bird communities of the Luga Bay: nesting, migrations and moult 71

Marine Geology

Kovaleva O., Ryabchuk D., Sergeev A., Zhamoida V., Nesterova E. Erosion of southern coastal zone of the Gulf of Finland: reasons, dynamics and prediction of its evolution 87

Ryabchuk D.V., Nesterova E.N., Zhamoida V.A., Kotilainen A., Vallius H., Sukhacheva L.L., Spiridonov M.A. Dynamics of sedimentation processes in the Neva Bay (the Gulf of Finland) under influence of anthropogenic factors 102

Dredging

Korneev O.Yu., Rybalko A.E., Fedorova N.K. Geoecological aspects of dredging in the Gulf of Finland. . . .119

Sukhacheva L.L. Ecological and other aspects of dredging during realization of large scale engineering projects in the eastern Gulf of Finland — summation of multiyear remote sensing observations 124

Pogrebov V.B., Kiyko O.A., Filippov A.A. Environmental impact assessment and monitoring of biological consequences of dredging in the Gulf of Finland, the Baltic Sea 133

Tsarkova N.S. Modeling of process of transfer of the weighed substances when carrying out dredging works in the Luga Bay of the Gulf of Finland 142

Spatial planning and coastal zone management

Kononenko M.R., Markovets I.M., Podgaiskiy E.V. Approaches to marine spatial planning in the Gulf of Finland. 151

Chusov A., Shilin M., Ryabchuk D., Sergeev A., Timoshina A. Construction of Lahta-Center on the reclaimed coastal territory in the Neva Bay 156

Ecology of the catchment basin

Kondratyev S.A., Maximov D.A., Shmakova M.V., Ulichev V.I. Model for calculation of nutrient load on aquatic systems 165

Zhigulsky V., Shuisky V., Tsarkova N., Solovey N.A., Maximova E.J. Response of a waterways macrozoobenthos to multifactor anthroogenic impact in the eastern part of gulf of Finland 178

Alkhimenko A.I., Zagryadskaya N.N., Kalinin S.G. Numerical simulation of suspended particles under dredging operations 186

List of authors. 199

ОКЕАНОЛОГИЯ

М.Б. Шилин, С.А. Коузов, Е.К. Ланге, Л.Ф. Литвинчук, С.В. Лукьянов, А.А. Максимов

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА АКВАТОРИИ СОЗДАВАЕМОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «ИНГЕРМАНЛАНДСКИЙ»

M.B. Shilin, S.A. Kouzov, E.K. Lange, L.F. Litvinchuk, S.V. Lukyanov, A.A. Maksimov

RESULTS OF THE COMPLEX EXPEDITION RESEARCH ON THE AREA OF THE PLANNED STATE NATURE RESERVE «INGERMANLANDSKIJ»

Излагаются результаты комплексных исследований прибрежно-морских экосистем акватории государственного природного заповедника «Ингерманландский». Приводится информация о состоянии на 2013 год в осеннее время фито- и зоопланктона, макрозообентоса, орнито- и териофауны, а также водного биотопа.

Ключевые слова: фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос, орнитофауна, териофоауна, водный биотоп.

Results of the complex investigation of the marine coastal ecosystems of the Ingermanklandskij Nature State Reserve are presented. The status of the phyto- and zooplankton, macrozoobenthos, ornito- and teriofauna, and the condition of the water biotope in the Fall is described.

Key words: phytoplankton, zooplankton, macrozoobenthos, ornitifauna, teriofauna, water biotope.

Осенью 2013 г. экспедицией Морского института РГГМУ (директор С.В. Лукьянов) были выполнены комплексные исследования состояния морской среды и биоразнообразия в малоизученном районе вновь организуемой островной особо охраняемой природной территории (ООПТ) федерального значения — государственного природного заповедника (ГПЗ) «Ингерманладский», с концентрацией на прибрежных мелководьях и береговой полосе четырех участков: архипелаг Долгий Камень, острова Большой Тютерс, Малый Тютерс и Сескар. Программа экспедиции была составлена с учетом взаимодействия работ по четырем научным проектам РГГМУ: «Комплексная оценка антропогенного воздействия на современное состояние подводных и прибрежных ландшафтов в зоне ООПТ в российском секторе глубоководной части Финского залива» (руководитель — С.В. Лукьянов), «Биоразнообразие как индикатор экологической уязвимости береговой зоны и малых островов замерзающих морей с учетом воздействия климатических и антропогенных факторов» (руководитель — Л.Н. Карлин), «Экологически дружественный

порт» (руководитель А.И. Богуш) и «Мониторинг орнито- и териофауны района морского газотрубопровода НОРДСТРИМ» (руководитель М.Б. Шилин). Перечисленные проекты являются вкладом РГГМУ в программу Международного Года Финского Залива (2014).

В состав экспедиционных работ входили:

– исследования водного биотопа (гидрологические исследования, включавшие инструментальные измерения характеристик течений, температуры, солености и прозрачности воды, и гидрохимические исследования, основанные на химическом анализе проб воды с поверхностных и придонных горизонтов);
– гидробиологические исследования биоразнообразия, состава и численности гидробиоты (фито- и зоопланктон, бентос);
– наблюдения за морскими птицами и млекопитающими.

Идея организации ГПЗ «Ингерманландский» предложена Биологическим НИИ СПБГУ, Госкомэкологией и Министерством окружающей среды Финляндии с целью сохранения морских и островных экосистем Восточной Прибалтики, мест обитания многих видов морских животных и растений, большого набора редких и исчезающих видов. Проект организации согласован со всеми ведомствами и прошел государственную экологическую экспертизу Госкомэкологии (№ 265 от 30 апреля 1998 г.). Заповедник организован по кластерному типу и состоит из девяти изолированных участков: части острова Большой Тютерс, островов Малый Тютерс, Северный и Южный Виргины, Сескар с примыкающей к островам акваторией залива, а также участка акватории у северного побережья Финского залива от государственной границы с Финляндией до Чистопольской бухты с островами Копытин, Долгий Риф, Долгий Камень, Крутояр и Рябинник и архипелагом Большой Фискар. Общая площадь заповедника равна 17 901 га, из которых на акваторию приходится 16 980 га. Предлагаемые особо охраняемые объекты: природные комплексы скал, приморской литорали, мелководных зон, редкие виды растений (смолка альпийская, смолевка скальная, глаукс приморский, астра солончаковая, дерен шведский) и животных (черный слизень, чернозобая гагара, пеганка, обыкновенная гага, орлан-белохвост, камнешарка, чеграва, чистик, дубровник, садовая соня, кольчатая нерпа, серый тюлень) (рис. 1).

Правовой статус ГПЗ «Ингерманландский» в настоящее время определяется приказом МПР № 67 от 22.02.2012 г., утвердившим Заключение комиссии государственной экологической экспертизы. Морские границы ГПЗ описаны словесно по изобатам 5 или 10 м. Непосредственное положение сухопутной и морской границ будет уточнено позже по результатам проведенных исследований. Заключение выдано сроком на 3 года, которые отводятся для создания административного штата заповедника и организации работы по охране заповедных природных территорий.

Название ГПЗ «Ингерманландский» связано с названием этнокультурного и исторического региона — Ингерманландией, расположенного по берегам Невы и ограниченного Финским заливом, Чудским и Ладожским озерами. Уникальные природные комплексы островов и акватории восточной части Финского залива сохранились до наших дней за счет удаленности островов от побережья и строгого пограничного режима. Природные комплексы ГПЗ «Ингерманландский» являются эталонами как для Балтийского моря, так и для всей Северной Европы. Создание данного ГПЗ — это важный этап выполнения Россией международных соглашений по реализации программ

природоохранных действий в Балтийском регионе (План действий ХЕЛКОМ, Рамсарская конвенция, Конвенция о биологическом разнообразии).

Рис. 1. Особо охраняемые объекты Ингерманландского ГПЗ:
слева — выводок чернозобой гагары *Gavia arctica*; справа — гигантский черный слизень *Limax cinereoniger*

Вплоть до сегодняшнего дня прибрежно-морские экосистемы акватории ГПЗ «Ингерманландский» остаются слабо изученными. Первые исследования гидробиоценозов некоторых островов, вошедших позднее в состав ГПЗ, были проведены в середине 1990-х гг. экспедициями РГГМУ на парусном катамаране «Ориентс» (рис. 2, слева) под руководством проф. А.В. Некрасова [27, 28]. В течение последующих десяти с лишним лет комплексные экспедиции на акватории создаваемого ГПЗ не проводились. Между тем, изучение прибрежно-морских экосистем ГПЗ «Ингерманландский» представляет большой интерес, так как они расположены вдали от промышленных объектов и судоходных путей, что позволяет рассматривать их как фоновые. Полученные данные по биологическим компонентам этих экосистем вероятно можно будет использовать для сравнительных оценок при проведении мониторинга и прогнозировании состояния Финского залива в целом. Особый интерес представляют данные осенних исследований, поскольку в научной литературе по Финскому заливу они встречаются нечасто, хотя и необходимы для прогнозирования численности гидробионтов в начале следующего вегетационного периода. Изменение состава гидробиологических сообществ осенью также может свидетельствовать об изменениях природных условий в исследуемой акватории.

Методы получения и обработки данных

В период с 28 сентября по 17 ноября 2013 г. выполнено 6 рейсов на МРС «Соболец» (рис. 2, справа). Обследованы районы архипелага Долгий Камень, островов Б. Тютерс, М. Тютерс и Сескар. В соответствии с требованиями безопасной навигации и выполнения работ на прибрежных мелководьях островов, все наблюдения проводились в светлое время суток при высоте волн до 2 м. В соответствии с морскими прогнозами, периоды проведения работ чередовались с периодами отстоя в ветрозащищенных районах.

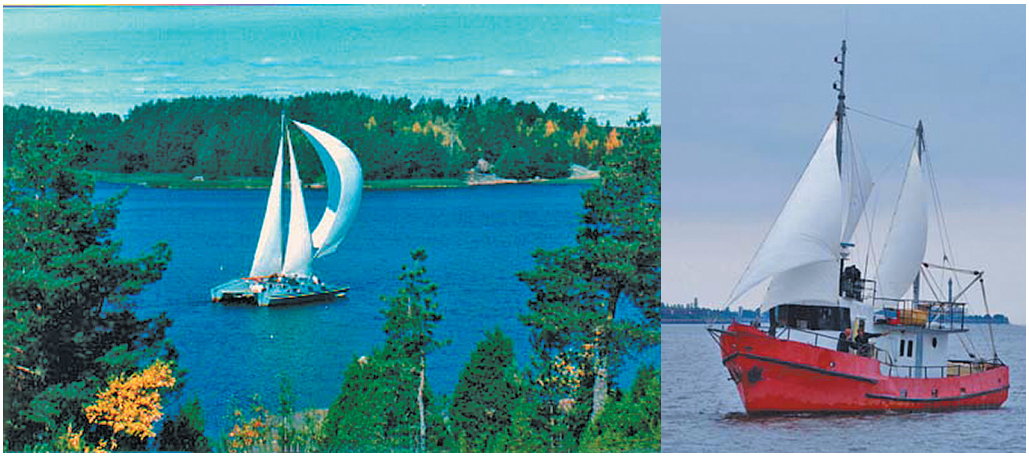

Рис. 2. Слева — исследовательский парусный катамаран «Ориентс» (фото 1996 г.); справа — МРС «Соболец» (осень 2013 г.)

Метеорологические характеристики определялись стандартными палубными приборами: аспирационным психрометром и ручным анемометром. Для оценки общей синоптической ситуации анализировалась синоптическая карта приземного анализа. Температура и соленость воды измерялись комплексным зондом CTD CD-90м (производство США). Течения измерялись с помощью автономного измерителя течений «Вектор-2» (разработка ААНИИ). Дискретность измерений 30 с. На горизонте прибор выдерживался 3–5 мин. Таким образом, на каждом горизонте получалось 6–11 циклов измерений. Полученные данные подвергались статистической обработке, в результате которой вычислялись средние характеристики течений по горизонтам. Прозрачность воды измерялась с помощью диска Секки. Для отбора проб воды использовался пластиковый батометр на 5 л (производство США).

Фитопланктон отбирали на 8 станциях вблизи архипелага Долгий Камень (ст. Д1-Д5), о. Сескар (ст. С1), о. М. Тютерс (ст. МТ1) и о. Б. Тютерс (ст. БТ1) (Табл. 1). Отбор проб и дальнейший их анализ проводили в соответствии с методиками, принятыми в Роскомгидромете, и рекомендациями HELCOM [19, 29]. Количественные пробы воды объемом 0,5 л отбирались интегрально из трофогенного слоя, соответствующего по глубине утроенной прозрачности, измеренной по диску Секки. Фиксация планктона осуществлялась модифицированным раствором Люголя [7]. Последующее сгущение водорослей проводилось стандартным методом седиментации до конечного объема пробы 10 мл. Счет организмов совершался в камере Нажотта объёмом 0,02 мл в проходящем свете с использованием микроскопа «Ergaval» (Karl Zeiss Jena) при увеличении ×256 и ×640. Регистрировали практически все встреченные виды водорослей, а также хлорофиллсодержащую инфузорию *Myrionecta rubrum* (= *Mesodinium rubrum*). За счетную единицу фитопланктона принимали 100 мкм длины трихома или одну клетку. Суммарную численность и биомассу рассчитывали стандартным методом. К доминирующим относили виды и группы водорослей, составляющие более 10 % от общей биомассы фитопланктона в пробе.

Таблица 1

Координаты комплексных гидролого-гидробиологических станций

№ п/п	Станции	Широта *N*	Долгота *E*	Время выполнения	Глубина, м	Белый диск, м	Примечание
1	Д1	60° 30’094	28° 02’520	13,15–14,50	10,0	2,5	26.10.2013: о. Туман
2	Д2	60° 29’077	27° 54’058	16,20–14,05	6,2	3,7	26.10.2013: о. Узорный
3	Д3	60° 28’758	27° 52’231	17,35–18,20	7,9	3,7	26.10.2013: о. Крутояр
4	Д4	60° 28’854	27° 51’799	10,40–11,25	5,0	3,0	27.10.2013: о. Крутояр
5	Д5	60° 28’470	27° 51’421	11,40–12,30	5,2	3,0	27.10.2013: о. Долгий Камень
6	БТ1	59° 51’356	27° 13’801	10,35–12,40	9,1	5,5	03.11.2013: о. Б. Тютерс
7	МТ1	59° 48’672	26° 53’093	18,55–19,20	11,5	темно	03.11.2013: о. М. Тютерс
8	МТ2	59° 48’479	26° 53’218	19,32–19,45	10,3	темно	03.11.2013: о. М. Тютерс
9	С1	59° 59’436	28° 19’646	19,20–19,40	7,0	темно	03.11.2013: о. Сескар

При оценке состояния фитопланктонного сообщества учитывались его таксономическое разнообразие, структура руководящего комплекса, соотношение основных систематических групп водорослей, их доля в общей биомассе фитопланктона, количественное развитие микроводорослей и распределение фитопланктона на исследованной акватории Финского залива.

Зоопланктон был собран на станциях D1–D5 (табл. 1) в районе архипелага Долгий Камень с помощью батометра, а также близ о-вов Б. и М. Тютерсы и Сескар (станции БТ1, МТ1, С1 соответственно) — с помощью малой сети Джеди (диаметр входного отверстия 0,18 м; газ № 64). Собранный материал был зафиксирован 4 % раствором формалина и исследовался в лабораторных условиях с применением стандартных методик.

Пробы бентоса отбирались дночерпателем Ван-Вина с площадью захвата 0,025 м^2 по два опускания в районе архипелага Долгий Камень (станции Д1–Д5), у о-вов Б. Тютерс (БТ1) и М. Тютерс (МТ2). На каждой станции брали по два дночерпателя. Илистые и песчаные грунты промывали через капроновое сито № 23 (размер ячеи около 0,4 мм). Промытый остаток фиксировали 4 % формалином. На каменистых грунтах, встреченных в районе о. М. Тютерс, количественный учет бентосных организмов проводили на основании данных по смыву с камней, поднятых со дна дночерпателем. Гидробионтов отделяли от собранного субстрата, затем определяли площадь проекции камней [16]. Собранный материал фиксировали 4 % формалином. Разборку проб осуществляли в лабораторных условиях по стандартной методике. Животных распределяли по видам или систематическим группам (олигохеты и личинки хирономид). Выборку мелких форм проводили под микроскопом МБС-9 при 8-кратном увеличении. Затем подсчитывали количество организмов каждого вида, обсушивали их на фильтровальной бумаге до момента прекращения появления мокрых пятен и взвешивали с точностью до 1 мг. Представители трудных в систематическом отношении групп, определение которых требует предварительного препарирования материала (олигохеты и личинки хирономид), взвешивались вместе. Моллюсков взвешивали вместе с раковиной. Из мантийной полости крупных моллюсков предварительно удаляли с помощью фильтровальной бумаги жидкость.

Орнитологические наблюдения проводили в форме судовых и береговых маршрутных учетов. Использовались стандартные методы учетов на протяженных маршрутах без ограничения полосы обнаружения [17, 20, 3], а также методы визуальных наблюдений за видимыми миграциями и поведением птиц, рекомендованные Прибалтийской комиссией по изучению миграций птиц [31]. При учетах мигрирующих птиц с борта судна использовались 25-кратный морской бинокль, 50–100-кратная подзорная труба «Юкон» и фотоаппарат Nikon D90 с объективом Nikkor AF-S 3500/4. Учитывались все попавшие в поле зрения птицы, при этом регистрировались высота и направление полета.

Териологические наблюдения проводили путем обследования береговой кромки островов М. Фискар, Б. Фискар, Сескар, Б. и М. Тютерс и банок: Косая, Кургальский риф, Вигрунд, Южная Сескарская, Вестгрунд, Темная Лода, Репина, Мерилода. Открытая акватория по курсу следования судна наблюдалась в бинокль на полную дальность обнаружения [6, 21]. Визуальные учеты проводились с использованием 25-кратного бинокля, 50–100-кратной подзорной трубы «Юкон» и фотоаппарата Nikon D90 с объективом Nikkor AF-S 3500/4.

Характеристика водного биотопа

Для восточной части Финского залива характерна эстуарийная трехслойная вертикальная термохалинная структура вод. Однако в период осенне-зимней конвекции при интенсивных штормах на малых глубинах она полностью размывается, и водная толща становится однородной от поверхности до дна.

В районе ***архипелага Долгий Камень*** температура и соленость по вертикали и между станциями менялись очень незначительно, что объясняется малыми глубинами и развитым вертикальным перемешиванием за счет осенней конвекции и ветро-волнового воздействия. Максимальная температура была зафиксирована на станции Д5 (на поверхности 8,05°С, у дна на глубине 4 м 7,97°С), минимальная на станции Д2 (на поверхности 7,39°С, у дна на глубине 5 м 7,31°С). Аналогично по солености минимальные значения зафиксированы на станции Д1 (на поверхности 4,54 ‰, у дна на глубине 9 м 4,56 ‰), максимальные значения — на станции Д3 (на поверхности 4,735 ‰, у дна на глубине 6 м 4,765 ‰). Очевидно, что изменения температуры по горизонтали определялись исключительно погодными условиями и были незначительны (до 0,6°С). По вертикали изменения были в разы меньше (до 0,1°С), что говорит об отсутствии вертикальной стратификации по температуре.

Близ ***о. Большой Тютерс*** скорости течений в шхерах между островами были незначительны и в среднем составляли 2–3 см/с. Максимальная скорость была зафиксирована на станции Д3 в протоке между островами, где она составила 6 см/с. Направление течений в шхерах при таких слабых потоках принципиального значения не имеет. Вертикальные профили температуры и солености воды на всех станциях были практически однородны по всей глубине. Температура изменялась в пределах от 7,2 до 8,8°С, соленость оставалась близкой к значению 4,1 ‰.

У ***о. Малый Тютерс*** практически постоянными оставались как значения температуры (6,9–7,2°С), так и солености (4,2–4,3 ‰). Скорости течений по сравнению с наблюдениями вблизи острова Б. Тютерс выросли до 14–20 см/с. Необходимо отметить,

что измерения проводились в период начала шторма при значительной высоте волн. В связи с этим, существенную роль в данном случае сыграла периодическая волновая составляющая.

На самом восточном участке работ, в районе ***о. Сескар***, температура воды была близка к значению 7 °С. При этом соленость закономерно уменьшилась до 3,66–3,88 ‰. Это обусловлено общей структурой вод в восточной части Финского залива: ближе к устью Невы соленость уменьшается.

Таким образом, на обследованных участках акватории ГПЗ наблюдалось практически полное перемешивание вод по всей вертикали. Незначительные горизонтальные изменения температуры и солености воды вполне адекватны расположению станций: ближе к северу и востоку соленость воды уменьшается. Динамика вод довольно интенсивная на всех исследованных участках, за исключением шхер архипелага Долгий Камень.

Фитопланктон

В составе фитопланктона обнаружено 45 таксонов микроводорослей из 6 систематических отделов, а также неидентифицированные жгутиковые формы, отнесенные к группе Flagellata. Наибольшим таксономическим разнообразием отличались цианобактерии (Cyanophyta) и диатомовые (Bacillariophyta) соответственно 13 и 12 таксонов. Далее шли динофитовые (Dinophyta) — 8, зеленые (Chlorophyta) — 7, криптофитовые (Cryptophyta) — 4, эвгленовые (Euglenophyta) — 1 таксон. Учитывались также зоомастигофора *Ebria tripartita* (ранее относилась к золотистым или динофитовым) и фотосинтезирующая инфузория *Myrionecta rubrum* (табл. 2).

Вблизи о. Туман (ст. Д1) архипелага Долгий Камень встречено 15 таксонов микроводорослей, среди которых наибольшим разнообразием отличались цианобактерии (6 таксонов) и зеленые (4 таксона) (рис. 3).

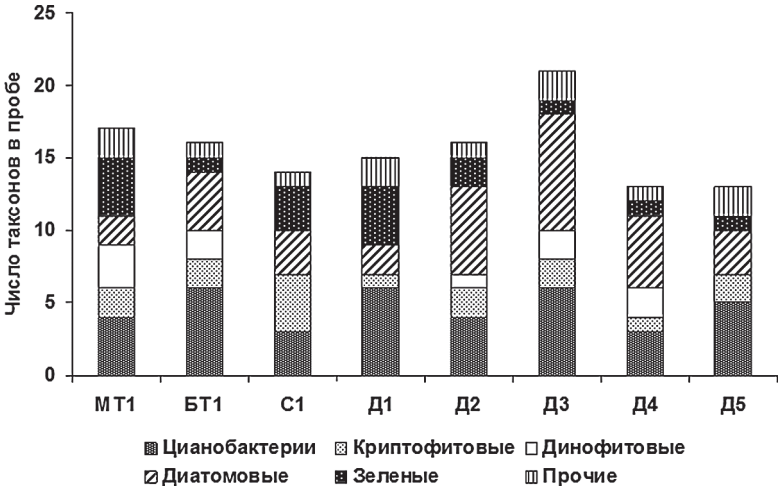

Рис. 3. Альфа-разнообразие фитопланктона

Таблица 2

Таксономический состав и количественные параметры фитопланктона

Таксон	Станции							
	МТ1	БТ1	С1	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5
Cyanophyta								
Aphanizomenon flos-aquae	248/48,68*	36/7,07	379/74,4	635/124,65	123/24,14		183/35,92	443/86,96
Anabaena sp.#6 мкм				8/0,9				
Aphanocapsa sp.	330/0,17	90/0,05			390/0,2	240/0,12		
Chroococcus aphanocapsoides	93/0,05	60/0,03						
Merismopedia tenuissima					64/0,11			
Planktolyngbya limnetica			155/0,55			130/0,46		
Planktolyngbya sp.		70/0,44						
Planktothrix agardhii								98/11,58
Pseudanabaena limnetica				30/0,11			320/1,14	85/0,3
Pseudanabaena sp.#2,5 мкм				84/1,03	247/3,63	52/0,64		80/0,98
Snowella sp.				35/0,22		198/1,25		
Woronichinia compacta	4480/67,2	2870/43,05	3500/52,5	3570/53,55	6160/92,4	3430/51,45	1400/21	840/12,6
Woronichinia spp.		52/0,33				305/2,27		
Cryptophyta								
Cryptomonadales #10×5 мкм			20/1,64					
Katablepharis ovalis			2/0,25					
Plagioselmis prolonga #5-7×3-4 мкм	13/0,33	27/0,68	7/0,18					
Plagioselmis prolonga #7-9×4-5 мкм	40/2,16	15/0,81	53/2,86	12/0,65		20/1,08	7/0,38	16/0,86
Teleaulax amphioxeia	23/5,15	30/6,72	3/0,67		12/2,69	9/2,02		2/0,45
Dinophyta								
Amphidinium crassum	1/1,14							
Amphidinium spp.					4/1,58			
Dinophysis acuminata		1/12,14					1/12,14	
Gymnodinium simplex	3/1,01							
Gymnodinium spp.#10-15×7-10 мкм							2/0,63	
Gymnodinium spp.#15-20×11-13 мкм						1/0,92		
Heterocapsa rotundata	5/0,66	19/2,51						
Protoperidinium granii						1/18,14		

Таксон	Станции							
	МТ1	БТ1	С1	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5
Bacillariophyta								
Actinocyclus octonarius	1/31,97	2/63,95					1/31,97	
Chaetoceros sp.#10×7,5 мкм						6/3,53		
Chaetoceros sp.#20×7,5 мкм					4/9,42			
Chaetoceros sp.#7,5×5 мкм		3/0,66	10/2,21					
Chaetoceros subtilis	7/0,53	12/0,9			8/0,6	23/1,73		
Coscinodiscus granii					1/281,34	1,5/422,02	1/281,34	
Cyclotella spp. #7,5×7 мкм						3/0,66		
Diatoma tenuis					3/1,08	16/5,76		
Rhoicosphenia abbreviata		1/0,84		3/2,52			1/0,84	1/0,84
Skeletonema costatum			4/2,21		278/153,73	297/164,24	85/47,01	
Synedra sp.						2/7,2		2/7,2
Thalassiosira baltica			3/9,42	5/15,7	3/9,42	6/18,84	4/12,56	2/6,28
Euglenophyta								
Eutreptiella sp.								2/1,83
Chlorophyta								
Monoraphidium contortum	30/0,6	30/0,6	15/0,3	120/2,4	80/1,6	175/3,5	15/0,3	40/0,8
Monoraphidium mirabile			1/0,15					
Oocystis sp.				4/0,18				
Planktonema lauterbornii	7/0,5			13/0,92				
Pyramimonas spp.	7/1,89		2/1,45					
Quadricoccus spp.				20/0,48				
Scenedesmus sp.	10/0,47				8/0,38			
Flagellata								
Жгутиковые формы #3-5 мкм	80/2,72	120/4,08	153/5,2	96/3,26	137/4,66	90/3,06	30/1,02	24/0,82
Жгутиковые формы #6-10 мкм	13/4,17			16/5,14		20/6,42		
Общая величина	**5391/169,4**	**3438/144,86**	**4307/153,99**	**4651/211,71**	**7522/586,98**	**5025,5/715,31**	**2050/446,25**	**1635/131,5**
Ebria tripartita				1/2,86		1/2,86		
Myrionecta rubrum		2/7,01	1/3,51	1/3,51		1/3,51	2/7,01	4/14,02

* Примечание: численность (млн кл/м^3)/биомасса (мг/м^3).

По обилию доминировали цианобактерии за счет вегетации *Woronichinia compacta* (77 % общей численности, 25 % общей биомассы) и *Aphanizomenon flos-aquae* (14,59 %). Уровень развития микроводорослей достигал 4 651 млн кл/м^3 (численность) и 212 мг/м^3 (биомасса) (рис. 4, 5).

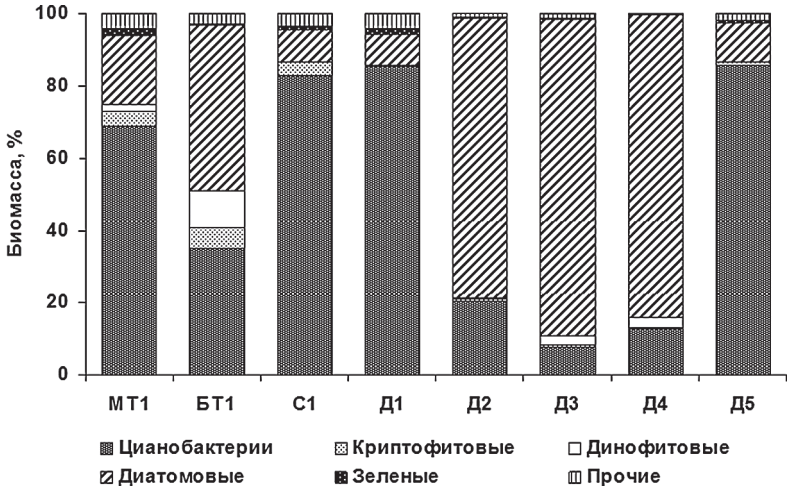

Рис. 4. Доля (%) систематических групп в общей биомассе фитопланктона

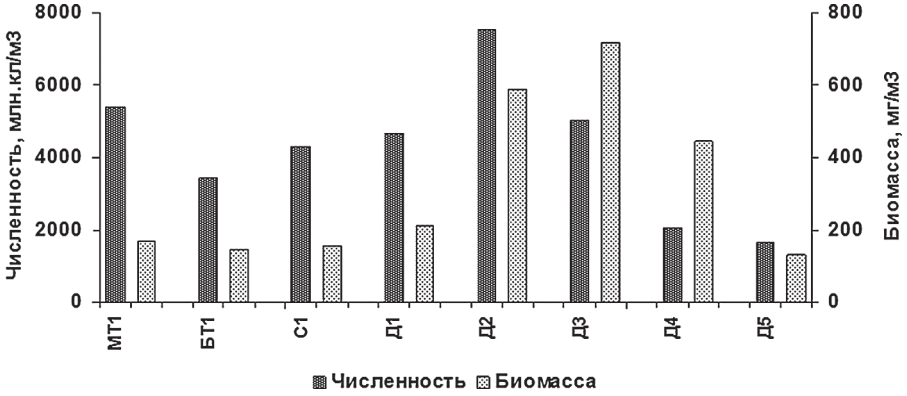

Рис. 5. Количественные параметры фитопланктона

Фитопланктоценоз у о. Узорный (ст. Д2) состоял из 16 таксонов; преобладали диатомовые (6 таксонов) и цианобактерии (4 таксона). В комплекс доминантов вошли: цианобактерия *W. compacta* (82 и 16 % суммарной численности и биомассы, соответственно) и диатомовые — крупноклеточная *Coscinodiscus granii* и мелкоклеточная *Skeletonema costatum*, составившие 48 и 26 % общей биомассы соответственно. Величина количественных параметров фитопланктона составила: численность 7 522 млн кл/м^3, биомасса 587 мг/м^3.

Вблизи о. Крутояр на ст. Д3 обнаружен 21, на ст. Д4 — 13 таксонов водорослей. Богатством видов выделялись диатомеи и цианобактерии. Основной фон фитопланктона обеспечивали диатомовые (84–87 % общей биомассы) — *C. granii* (59–63 %) и *S. costatum* (11–23 %). По численности превалировала цианобактерия *W. compacta,* чья доля составила 68 %. Уровень развития фитопланктона соответствовал 2050–5026 млн кл/м^3 (численность) и 446–715 мг/м^3 (биомасса) с наибольшими показателями на ст. Д3.

В планктоне вблизи о. Долгий Камень (ст. Д5) встречено 13 таксонов микроводорослей с преобладанием цианобактерий (5 таксонов). Они же формировали и структуру количественных параметров как по численности (доля 95 %), так и по биомассе (85 %) за счет вегетации *W. compacta* (51 % суммарной численности) и *Aph. flos-aquae* (27 и 66 % общей численности и биомассы соответственно). В целом обилие микроводорослей составило — 1635 млн кл/м^3 и 132 мг/м^3.

Фитопланктоценоз у о. Сескар (ст. С1) формировало 14 таксонов водорослей. Систематические группы имели сходное количество таксонов. Преобладали цианобактерии — *W. compacta* (81 и 34 % общей численности и биомассы) и *Aph. flos-aquae* (48 % биомассы фитопланктона). Количественные параметры характеризовались величиной численности 4307 млн кл/м^3 и биомассы 154 мг/м^3.

Фитопланктонное сообщество у о. Б. Тютерс (ст. БТ1) составляло 16 таксонов, среди которых разнообразием выделялись цианобактерии (6 таксонов) и диатомовые (4 таксона). Эти группы микроводорослей определили и структуру количественных параметров фитопланктона в целом. Основу численности на 83 % обеспечила цианобактерия *W. compacta*, ее вклад в биомассу микроводорослей составил 30 %. Суммарную биомассу на 44 % определяла также диатомовая *Actinocyclus octonarius.* Уровень вегетации альгофлоры достиг 3 438 млн кл/м^3 и 145 мг/м^3.

Вблизи о. М. Тютерс (ст. МТ1) выявлено 17 таксонов микроводорослей, при этом разнообразие систематических групп было сходным. По численности доминировала цианобактерия *W. compacta* (доля 83 %), по биомассе, кроме нее (доля 40 %), — диатомовая A. octonarius (19 %) и другая цианобактерия *Aph. flos-aquae* (29 % суммарной биомассы). Общую биомассу фитопланктона (169 мг/м^3) формировали на 69 % цианобактерии и на 19 % — диатомовые водоросли. Суммарная численность равнялась 5 391 млн кл/м^3.

Таким образом, на обследованных участках акватории ГПЗ таксономическое разнообразие (альфа-разнообразие) фитопланктоценозов было относительно высоким — в среднем 16±1 таксон/проба с максимумом 21 таксон на ст. Д3 (о. Крутояр). Исследованные фитопланцктоценозы различались структурой доминантного комплекса (табл. 3).

Повсеместно обилие фитопланктона обеспечивали цианобактерии, причем наибольший вес (более 80 % общей биомассы) они имели вблизи о. М. Тютерс (ст. МТ1), о. Сескар (ст. С1), о. Туман (ст. Д1) и о. Долгий камень (ст. Д5).

Среди цианобактерий на всех станциях численность и биомассу микроводорослей (кроме ст. Д3, Д4 и Д5) на 51-83 % и 30-40 % соответственно формировал хроококковый колониальный вид *Woronichinia compacta* (табл. 3) — осенний доминант глубоководного района восточной части Финского залива [10]. Кроме него, у о. М. Тютерс, о. Сескар, о. Туман и о. Долгий Камень биомассу альгофлоры на 29-66 % определяла потенциально токсичная цианобактерия *Aph. flos-aquae* (табл. 3) — один из основных доминантов позднелетнего фитопланктона Финского залива [10, 22, 25, 32] и Балтики в целом [30, 26].

Таблица 3

Структура доминантного комплекса фитопланктона по биомассе

Таксон / Станция	Цианобактерии		Диатомовые		
	Woronichinia compacta	*Aphanizomenon flos-aquae*	*Actinocyclus octonarius*	*Coscinodiscus granii*	*Skeletonema costatum*
МТ1	д	д	д	-	-
БТ1	д	+	д	-	-
С1	д	д	-	-	+
Д1	д	д	-	-	-
Д2	д	+	-	д	д
Д3	+	-	-	д	д
Д4	+	+	-	д	д
Д5	+	д	-	-	-

Примечание: Д — доминант, «+» — встречен, «-» — не встречен.

Практически на всех станциях наблюдения (кроме ст. Д1, С1) основу биомассы фитопланктона определяли диатомовые водоросли (11-87 %). Из них центрические солоноватоводные-морские *C. granii* и *S. costatum* превалировали вблизи о. Узорный и о. Крутояр архипелага Долгий Камень, а *A. octonarius* — у о-вов Малый и Большой Тютерс (табл. 3). Указанные виды — обычные доминанты летне-осеннего фитопланктона Финского залива [10, 22]. В целом, количественное развитие микроводорослей исследованной акватории (320±81 мг/м3) было сравнимо с соответствующими данными прошлых лет: сентябрь 1973 г. — 0,3-0,8 мг/л [33]; сентябрь 1980 г. — 0,25 мг/л [2]; осень 1985-1988 гг. — до 0,5 мг/л [23].

Зоопланктон

В ходе исследования зоопланктонного сообщества найдено 13 таксонов эупланктонных и меропланктонных (личинки донных животных) организмов. Среди них обнаружено 4 вида коловраток (Rotifera), 2 вида ветвистоусых ракообразных (Cladocera), 4 вида веслоногих ракообразных (Copepoda), а также меропланктонные личинки усоногих ракообразных *Amphibalanus improvisus* и многощетинковых червей Polychaeta рода Marenzelleria (табл. 4). Обе эти формы — эвригалинно-морские, встречаются в открытых частях Балтийского моря и в западной части Финского залива. Велигеры *Dreissena polymorpha,* в массе развивающиеся в летние месяцы, встречены не были. В составе зоопланктона были отмечены только солоноватоводные и эвригалинно-морские формы.

Для начала ноября было неожиданностью встретить в планктонных сборах теплолюбивую понто-каспийскую форму *Evadne anonyx* (район Большого Тютерса). Массового развития в планктоне Финского залива этот вид достигает в период наиболее высокой температуры воды в конце июля — начале августа.

Таблица 4

Видовой состав зоопланктона*

	D 1	D 2	D 3	D 4	D 5	БТ 1	МТ 1	С 1
Rotifera								
Keratella cochlearis baltica (Sokolova, 1927)	д	д		+	д			
Keratella quadrata (O.F. Muller, 1786)		+						
Keratella quadrata platei (Jagerskiold, 1894)		+	+	+		+	+	+
Synchaeta baltica (Ehrenberg, 1834)			д	д	д	д	д	+
Crustacea								
Cladocera								
Bosmina coregoni maritima (O.F. Muller, 1776)	д	д	д			+	+	+
Evadne anonyx (G.O. Sars, 1897)						+		
Copepoda								
Calanoida								
Acartia tonsa (Dana, 1849)						+	+	+
Eurytemora affinis (Poppe, 1880)						+	+	д
Heterocope appendiculata (Sars, 1863)						+	+	+
Науплиальные стадии *Calanoida*	д		д	д	д	д	д	д
Младшие копеподитные стадии *Calanoida*	д		д	д	д	д	д	д
Cyclopoida								
Младшие копеподитные стадии *Eucyclops serrulatus* (Fischer, 1851)			д	+		+	+	+
Harpacticoida		+						+
Меропланктон								
Личинки *Amphibalanus improvisus* (Darwin, 1854)							+	
Личинки *Polychaeta* рода *Marenzeleria*								+

* + присутствовали в пробе, д — доминирующие виды

Средние численность и биомасса зоопланктона в районе архипелага Долгий Камень составляли 27 тыс. экз/м^3 и 0,11 г/м^3 соответственно. В районе о-вов Большой Тютерс, Малый Тютерс и Сескар численность и биомасса зоопланктона были значительно ниже и в среднем для этой акватории были равны соответственно 3,85 тыс. экз/м^3 и 0,04 г/м^3 (табл. 5). Максимальные численность и биомасса зоопланктона были отмечены в районе архипелага Долгий Камень (станция D4) и составляли 44 тыс. экз/м^3 и 0,23 г/м^3 соответственно. Наименьшие количественные показатели зоопланктона зафиксированы в районе о. Большой Тютерс (1,27 тыс. экз/м^3 и 0,008 г/м^3 соответственно).

Таблица 5

Численность и биомасса зоопланктона (*N*, тыс. экз/м^3, *B*, г/м^3) и доля в них основных систематических групп зоопланктона (%)*

Станция	Дата	Copepoda	Cladocera	Rotifera	Прочие*	*N*, тыс. экз м$^{-3}$ / *B*, г м$^{-3}$
D1	26.10.13	50,00 / 28,68	25,00 / 71,21	25,00 / 0,11	0,000 / 0,000	12,12 / 0,095
D2	26.10.13	14,29 / 10,68	28,57 / 81,25	57,14 / 8,07	0,000 / 0,000	21,21 / 0,058
D3	26.10.13	44,44 / 58,51	22,22 / 38,71	33,33 / 2,77	0,000 / 0,000	27,27 / 0,155
D4	27.10.13	63,64 / 95,25	0,00 / 0,00	36,36 / 4,75	0,000 / 0,000	44,00 / 0,232
D5	27.10.13	35,71 / 65,58	0,00 / 0,00	64,29 / 34,42	0,000 / 0,000	28,00 / 0,015
БТ1	03.11.13	72,97 / 87,07	1,93 / 9,76	25,10 / 3,17	0,000 / 0,000	1,27 / 0,008
МТ1	03.11.13	73,06 / 93,33	1,38 / 2,30	25,44 / 4,37	0,130 / 0,006	3,14 / 0,015
С1	04.11.13	95,05 / 97,49	3,67 / 2,43	1,19 / 0,08	0,090 / 0,001	7,15 / 0,084
средние *N* и *B*						**18,02**±14,76 / **0,08**±0,08

* в числителе — *N*, численность, в знаменателе *B*, биомасса; * — личинки баланусов и полихет.

В районе архипелага Долгий Камень пробы отбирались в конце октября при помощи батометра, более «уловистого» инструмента. В начале ноября зоопланктон был собран планктонной сетью. Разница в количестве зоопланктона вполне может быть объяснена различными сроками сбора материала, а также тем, что при сборе материала были использованы разные орудия лова.

При сопоставлении данных по сетным пробам за 2013 г. с предыдущими годами следует отметить, что численность и биомасса зоопланктона в начале ноября 2013 г. значительно уступают таковым, полученным в конце июля 2004–2011 гг. (табл. 6). Такая разница не удивительна, так как большинство форм зоопланктона исчезает из пелагического пространства и зимует в виде диапаузирующих стадий на дне водоема. В частности, в наших сборах не были отмечены особи хищной коловратки *Asplanchna priodonta*, обычного и часто встречающегося в акватории Финского залива вида. Но, при этом, в материале, собранном на станциях D4 и D5, были найдены зимующие яйца этого вида.

При рассмотрении таксономической структуры зоопланктона можно выделить на всех исследованных станциях (кроме станции D1) доминирование по численности науплиальных и младших копеподитных стадий веслоногих ракообразных (табл. 5). Также практически на всех станциях преобладали мелкие коловратки *Synchaeta baltica* и ветвистоусое ракообразное *Bosmina coregoni maritima*. Мелкая коловратка *Keratella cochlearis baltica,* в массе развивающаяся в планктоне Финского залива в летние месяцы по всей

его акватории, в конце октября была встречена не на всех станциях (только на станциях D1, D2, D4 и D5). В начале ноября эта коловратка не была отмечена в планктоне.

Таблица 6

Изменения численности (*N*, тыс. экз/м^3) и биомассы (*B*, г/м^3) зоопланктона в восточной части Финского залива в конце июля 2004–2011 гг.

	Численность	Биомасса
2004	19,14	0,22
2005	32,63	0,29
2006	40,17	0,77
2007	56,44	0,91
2008	45,02	0,48
2009	54,40	1,87
2010	33,30	0,55
2011	42,04	1,24

Основу биомассы зоопланктона также на всех станциях (кроме станции D1) составляли науплиальные и младшие копеподитные стадии веслоногих ракообразных. Доминирование взрослых копеподитных стадий было отмечено только для *Eurytemora affinis* в районе о-вов Б. Тютерс и Сескар. Интересно отметить, что среди преобладающих по биомассе форм на станции D5 была отмечена мелкая коловратка *Synchaeta baltica*.

Группа микрофагов была представлена мелкими коловратками. Среди макрофильтраторов преобладали молодь веслоногих ракообразных и ветвистоусый рачок *Bosmina coregoni maritima* (табл. 7, 8). Поздней осенью пищевые ресурсы микрофагов (бактерио- и фитопланктон) резко сокращаются, к середине ноября доля микрофагов в планктоне значительно снижается. В зимние месяцы численность зоопланктона минимальна, встречается, в основном, молодь веслоногих ракообразных [23].

Таблица 7

Численность зоопланктона (*N*, тыс. экз/м^3) и доля в ней основных трофических групп (%)

Станция	Микрофаги	Макро-фильтраторы	Альго- и зоофаги	Хищные	*N*, тыс. экз м$^{-3}$
D1	25,00	75,00	0,00	0,00	12,12
D2	57,14	28,57	14,29	0,00	21,21
D3	33,33	66,67	0,00	0,00	27,27
D4	36,36	63,64	0,00	0,00	44,00
D5	64,29	35,71	0,00	0,00	28,00
БТ1	25,10	70,27	4,25	0,39	1,27
МТ1	25,57	72,93	1,50	0,00	3,14
С1	1,28	89,00	9,72	0,00	7,15
средняя *N*					**18,02**±14,76

Таблица 8

Биомасса зоопланктона (*B*, г/м^3) и доля в ней основных трофических групп (%)

Станиция	Микрофаги	Макро-фильтраторы	Альго- и зоофаги	Хищные	В, г/м^3
D1	0,11	99,89	0,00	0,00	0,10
D2	8,07	81,25	10,68	0,00	0,06
D3	2,77	97,23	0,00	0,00	0,15
D4	4,75	95,25	0,00	0,00	0,23
D5	34,42	65,58	0,00	0,00	0,02
БТ1	3,17	60,67	31,90	4,27	0,008
МТ1	4,37	83,06	12,58	0,00	0,015
С1	0,08	61,00	38.92	0,00	0,08
средняя *B*					**0,08**±0,08

Макрозообентос

По результатам исследования, на станциях участка «Долгий Камень» макрозообентос был представлен олигохетами, полихетами *Marenzelleria sp.,* немертинами *Cyanophtalma obscura*, моллюсками *Macoma balthica* и *Valvata (Cincinna) pulchella* и личинками хирономид (6 личиночных форм) (табл. 9). Несмотря на то, что исследованные станции компактно располагались в одном районе на небольшом расстоянии друг от друга, численность, биомасса и разнообразие животных макрозообентоса варьировали в довольно широких пределах (табл. 9, 10). Однако такая неравномерность распределения бентоса не вызывает удивления, поскольку район исследований характеризуется очень сложным рельефом дна, разнообразием и мозаичным характером распределения грунтов. По численности макрозообентоса на всех станциях доминировали олигохеты. Роль этих животных особенно велика на илистых грунтах, где на их долю приходилось более 80 % всего донного населения. На песчаных грунтах (ст. Д-2) эти животные составляли 34 % численности макрозообентоса. По биомассе различия между станциями в составе бентоса более заметны. На самых глубоких станциях (ст. Д-1 и Д-3), где залегали илы, макрозообентос был представлен, главным образом, личинками хирономид и олигохетами. На ст. Д-1 в небольшом количестве были также встречены полихеты *Marenzelleria sp.* В биомассе резко доминировали хирономиды, главным образом, за счет развития крупных личинок *Chironomus plumosus.* На их долю приходилось более 2/3 суммарной биомассы бентоса. На более мелководных станциях, для донных осадков которых характерна значительная примесь песчаного материала, состав донной фауны был существенно разнообразнее, при этом ведущая роль в бентосе принадлежала двустворчатым моллюскам *Macoma balthica* (ст. Д-2 и Д-4) и полихетам *Marenzelleria* sp. (ст. Д-5), составлявших более 50 % общей биомассы (табл. 1, 2).

На станции БТ-1, относящейся к акватории участка «Большой Тюттерс», макрозообентос был представлен олигохетами, двустворчатыми моллюсками *M. balthica* и ракообразными *Bathyporeia pilosa* и *Saduria entomon*. Для исследованной станции

был характерен песчаный грунт. Численность и биомасса донных животных были сравнительно невысоки (табл. 9, 10). При этом основную роль в бентосе играли два вида ракообразных. В численности доминировали амфиподы *B. pilosa* (56 %). Заметную часть численности макрозообентоса составляли также олигохеты (33 %), вследствие массового развития мелких форм из сем. Naididae, и молодь *M. balthica*. Численность изопод *S. entomon* была незначительна, однако вследствие крупных размеров на долю этого вида приходилось 45 % биомассы всего бентоса. Доля амфипод составляла 52 %. Таким образом, два вида ракообразных обеспечивали 97 % суммарной биомассы макрозообентоса.

Таблица 9

Численность животных макрозообентоса (экз/м^2)

Станция	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	БТ-1	МТ-2
Глубина, м	10	6,2	7,9	5	5,2	9,1	9,3
Грунт	ил	илистый песок	серый ил	ил с песком	песчанистый ил	песок	камни
Marenzelleria sp.	40	20	-	20	80	-	-
Oligochaeta	1320	220	1060	1080	1740	540	-
Cyanophtalma obscura	-	100	-	-	20	-	-
Macoma balthica	-	140	0	120	-	160	-
Mytilus trossulus	-	-	-	-	-	-	10079
Dreissena polymorpha	-	-	-	-	-	-	155
Theodoxus fluviatilis	-	-	-	-	-	-	543
Ecrobia ventrosa	-	-	-	-	-	-	78
Valvata (Cincinna) pulchella	-	40	-	80	-	-	-
Saduria entomon	-	-	-	-	-	20	0
Jaera aff. albifrons	-	-	-	-	-		1396
Bathyporeia pilosa	-	-	-	-	-	920	0
Gammarus sp. juv.	-	-	-	-	-	-	388
Amphibalanus improvisus	-	-	-	-	-	-	4264
Chironomidae	200	120	180	10	60	-	1473
Всего	**1560**	**640**	**1240**	**1310**	**1900**	**1640**	**18375**

Станция МТ-2 участка «Малый Тютерс» характерна очень разнообразная донная фауна. Здесь на каменистых грунтах обитали двустворчатые моллюски *Mytilus trossulus* и *Dreissena polymorpha,* брюхоногие моллюски *Theodoxus fluviatilis* и *Ecrobia ventrosa,* три вида ракообразных (*Jaera* aff. *albifrons, Gammarus* sp. juv., *Amphibalanus improvisus*) и личинки хирономид (табл. 9). Численность и биомасса макрозообентоса также достигали колоссальных величин (соответственно более 18 тыс. экз/м^2 и 500 г/м^2). Несмотря на

столь высокое разнообразие, основу численности и биомассы обеспечивали всего два вида: двустворчатый моллюск мидия (*Mytilus trossulus*) и усоногий рачок *Amphibalanus improvisus* (рис. 6). В общей сложности на долю этих видов приходилось около 80 % численности и 97 % биомассы всего макрозообентоса (табл. 9, 10).

Таблица 10

Биомасса животных макрозообентоса (г/м^2)

Станция	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	БТ-1	МТ-2
Глубина	10	6,2	7,9	5	5,2	9,1	9,3
Грунт	ил	илистый песок	серый ил	ил с песком	песчаниcтый ил	песок	камни
Marenzelleria sp.	0,26	0,24	-	0,08	1,22	-	-
Oligochaeta	1,02	0,26	1,38	0,24	0,96	0,02	-
Cyanophtalma obscura	-	0,18	-	-	0,04	-	-
Macoma balthica	-	1,44	-	5,98	-	0,04	-
Mytilus trossulus	-	-	-	-	-	-	94,90
Dreissena polymorpha	-	-	-	-	-	-	9,30
Theodoxus fluviatilis	-	-	-	-	-	-	6,51
Ecrobia ventrosa	-	-	-	-	-	-	0,23
Valvata (Cincinna) pulchella	-	0,12	-	1,30	-	-	-
Saduria entomon	-	-	-	-	-	0,90	-
Jaera aff. albifrons	-	-	-	-	-		0,31
Bathyporeia pilosa	-	-	-	-	-	1,06	-
Gammarus sp.juv.	-	-	-	-	-	-	0,23
Balanus improvisus	-	-	-	-	-	-	404,71
Chironomidae	2,70	0,34	7,30	0,02	0,10	-	-
Всего	**3,98**	**2,58**	**8,68**	**7,62**	**2,32**	**2,02**	**516,20**

На песчаных отмелях в районе о. Сескар макрозообентос был представлен олигохетами, полихетами *Marenzelleria neglecta*, немертинами *C. obscura*, ракообразными *Saduria entomon* и *Gammarus zaddachi,* двустворчатыми моллюсками *Macoma baltica* и *Dreissena polymorpha* и личинками хирономид *Glyptotendipes sp*. Показатели обилия макрозообентоса варьировали в очень широких пределах. Численность изменялась от 40 до 1160 экз/м^2. Минимальная биомасса не превышала 0,01 г/м^2, максимальная достигала 12,40 г/м^2. Крайне низкие величины, отмеченные на отдельных станциях, по-видимому, являются последствием ведущейся добыче песка, приводящей к уничтожению природных сообществ на локальных участках дна. На участках, не затронутых работами, доминировали *M. balthica* и *M. neglecta*. На долю двух указанных видов приходилось около 70 % численности и более 90 % биомассы всего бентоса.

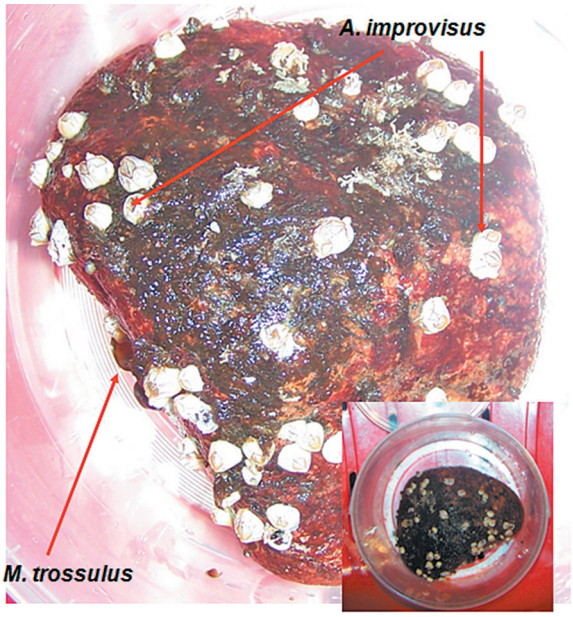

Рис. 6. Поселения *Balanus improvisus* и *Mytilus trossulus* на станции МТ-2 участка «Малый Тютерс»

Полученные нами данные по участку «Долгий Камень» в целом соответствуют сложившимся представлениям о составе и распределении макрозообентоса восточной части Финского залива. Основу биомассы бентоса составляли типичные для Финского залива и других сильно опресненных районов Балтийского моря виды. В частности, сообщества хирономид и *M. balthica* характерны для восточного мелководного района вершины Финского залива [11, 23]. Полихеты рода *Marenzelleria*, хотя и являются чужеродными видами для Балтийского моря, уже давно стали одним из ведущих компонентов бентоса восточной части Финского залива [13, 14]. То же самое относится и к району о. Сескар, где доминировали те же широко распространенные в настоящее время в заливе виды моллюсков и полихет.

Несмотря на крайне поверхностное обследование донных сообществ у берегов о-вов Б. и М. Тютерс, полученные здесь новые результаты позволили заметно расширить наши знания о бентосе Финского залива и его разнообразии. В частности, в фаунистическом отношении несомненный интерес представляет обнаружение двустворчатых моллюсков мидий *M. trosssulus* и амфипод *B. pilosa* (рис. 6). Важно отметить, что в обоих случаях популяции обнаруженных видов отличались высоким количественным развитием и играли доминирующую роль в бентосных сообществах.

Косвенные указания на вероятное наличие мидий в пределах современных границ российской части акватории Финского залива приводятся в сводке А. Ярвекюльга (1979), где о. Гогланд без приведения источника информации указан в качестве восточного предела распространения этого вида в Балтийском море. Однако достоверных сообщений о находках здесь этого вида в более позднее время нам не известно. В ходе исследований

1990-х гг. мидия на о-вах М. Тютерс и Гогланд обнаружена не была [27, 28]. В новейшей сводке по фауне вершины Финского залива [1] *M. trosssulus* в списке видов также не значится. *B. pilosa* известны из сопредельных вод Эстонии [24], но в российских водах этот вид регистрируется впервые. По результатам же проведенных нами исследований совершенно определенно можно утверждать, что в прибрежной зоне Большого и Малого Тютерсов обитают одни из самых восточных в Балтийском море популяций указанных видов. Учитывая мозаичность распределения бентосных организмов, можно полагать, что более детальные исследования, выполненные на базе плотной сетки станций, позволили бы существенно расширить список таких находок. Таким образом, по-видимому, заповедные острова могут представлять интерес с точки зрения охраны биоразнообразия не только наземных, но и прибрежных водных экосистем.

Орнитофауна

Острова ГПЗ «Ингерманландский» используются птицами в качестве мест гнездования, кормежки и отдыха на миграциях. Время проведения экспедиционных исследований совпало с периодом осенней миграции. На 4 маршрутах в сентябре — первой половине октября учтено 39 655 особей 48 видов. Доминировал гоголь, субдоминантами являлись свиязь и морянка. Многочисленны были белолобый гусь, кряква, чирок-свистунок, хохлатая чернеть, турпан, сизая и озерная чайки; обычны — чернозобая гагара, большой баклан, широконоска, большой крохаль, лысуха, серебристая чайка и речная крачка. Кулики, у которых заканчивался основной пролет, были представлены лишь единичным числом особей. Валовый пролет казарок, судя по опросным сведениям, прошел через Финский залив между нашими 3-м и 4-м судовыми учетами, когда из-за штормовой погоды был невозможен выход в море.

Основной пролет больших бакланов, речных уток, хохлатых чернетей, гоголей и лысух шел в течение 2-й половины сентября, валовый пролет гагар, казарок и морских нырковых уток — в первой половине октября. У чаек наблюдалось 2 пика пролета — в середине сентября и 10–14 октября. Массовый пролет речных уток, чернетей, гоголей и лысух шел из Невской губы через о-ва Сескар (рис. 7) и Мощный, где наблюдались самые массовые стоянки этих птиц. Так, 26–27 сентября у о. Сескар держалось до 9689 речных уток, 130 хохлатых чернетей, 3100 гоголей и 360 лысух.

Гагары, казарки и морские нырковые утки следовали по целому спектру направлений — как от Выборгского залива, так и от северного края Невской губы и мыса Стирсуден в сторону Нарвского залива. Их локальные пролетные пути собирались, как в фокусе, в районе Лужской губы и Кургальского рифа, где наблюдались самые массовые скопления этих птиц — до нескольких тысяч уток. Слабый пролет мигрантов этой группы шел также вдоль северного берега Финского залива к Финским открытым шхерам, где, возможно, существуют их массовые стоянки. Это подтверждается наличием заметного пролета морских нырков в меридиональном направлении из Финских шхер в сторону островов Мощный, Гогланд и Б. Тютерс.

Результаты наблюдений позволяют сделать вывод, что прибрежные воды архипелага Б. Фискар являются местом постоянных стоянок на осеннем пролете чистиковых — гагарки и чистика.

Рис. 7. Миграционные скопления свиязи *Anas penelope* в сентябре у о. Сескар

Териофауна

Морские млекопитающие в акватории ГПЗ «Ингерманландский» представлены двумя видами ластоногих: балтийской кольчатой нерпой *Phoca hispida botnica* и серым тюленем *Halichoerus grypus* [18, 6]. Оба вида тюленей занесены в Красные книги России, Балтийского региона и восточной Фенноскандии. По данным многолетнего мониторинга, нерпа образует в восточной части залива локальную «российскую» популяцию, численность которой не превышает 300 особей. Численность серого тюленя на российской части Финского залива в летнее время достигает 400–500 особей [5, 21]. Если поголовье серого тюленя в заливе достаточно стабильно, то численность «российской» популяции нерпы неуклонно сокращается и в настоящее время приблизилась к критически низкому пределу, так что реальна возможность ее полного исчезновения. В период экспедиционных исследований нерпа была встречена один раз на камнях у о. Б. Тютерс (рис. 8). Наибольшее количество серых тюленей было отмечено на банках Вестгрунд и Вигрунд — до 79 особей (рис. 9). В начале октября 3 зверя были встречены также у банки Халикарти.

В целом наблюдения за нерпой и серым тюленем на залежках существенно осложнялись их нестабильностью, поскольку тюлени лежат на камнях только в очень тихую погоду. Кроме того, нерпа и серый тюлень при подходе моторного судна стараются сходить с камней. Для более точных учетов их в определенных районах требуются стационарные наблюдения. При маршрутных учетах желательно использовать яхты, а не моторные суда с металлическим корпусом. Наиболее точные данные по нерпе могут дать зимние авиаучеты зверей на льду [15].

Рис. 8. Кольчатая нерпа *Phoca hispida botnica* на камнях у о. Б. Тютерс

Рис. 9. Залежка серых тюленей *Halichoerus grypus* на банке Вигрунд 14 октября 2013 г.

Выводы

В сентябре-ноябре 2013 г. на акватории ГПЗ «Ингерманландский» были отмечены количественные и структурные характеристики сообществ фито- и зоопланктона, типичные для данной акватории. Находка термофильной понто-каспийской кладоцеры *Evadne anonyx* позволяет дополнить сведения по биологии этого вида далеко на севере, за пределами его нативного ареала, и расширить представления о его адаптивности по отношению к сравнительно низким температурным условиям.

Результаты исследования донных биоценозов позволили заметно расширить знания о бентосе Финского залива и его разнообразии. Особый интерес представляет обнаружение двустворчатых моллюсков мидий *M. trosssulus* и амфипод *B. pilosa*. Полученные данные позволяют утверждать, что в прибрежной зоне Большого и Малого Тютерсов обитают одни из самых восточных в Балтийском море популяций указанных видов. Важно отметить, что обнаруженные популяции отличаются высоким уровнем количественного развития и играют доминирующую роль в бентосных сообществах. Учитывая мозаичность распределения бентосных организмов, можно полагать, что более детальные исследования в будущем позволят существенно расширить список таких находок. Таким образом, заповедные острова могут представлять интерес с точки зрения охраны биоразнообразия не только наземных, но и прибрежно-морских водных экосистем.

Показатели состояния орнитофауны находились в рамках фоновых параметров, не выходя за пределы естественных флуктуаций, что соответствует стабильному состоянию местного орнитоценоза. Результаты наблюдений позволяют уточнить направления и маршруты осенней миграции гидрофильных видов. Может быть сделан вывод о том, что прибрежные воды архипелага Б. Фискар являются местом постоянных стоянок на осеннем пролете редких видов чистиковых — гагарки *Alca torda* и чистика *Cephus grulle*.

Наблюдения за тюленями показали, что банка Вигрунд, расположенная в 1,5 км от Кургальского полуострова, используется серым тюленем *Halichoerus grypus* для залежки не только в летнее, но и в осеннее время. Это необходимо учитывать при прокладке маршрутов подходных путей к Усть-Лужскому портовому комплексу.

Литература

1. *Алимов А.Ф., Голубков С.М. (ред.)* Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы. — М: Товарищество научных изданий КМК, 2008. — 477 с.
2. *Балоде М.Я.* Фитопланктон. Гидробиологический режим района Клайпеда-Швинтойи. // Экологическое состояние прибрежных вод и грунтов юго-восточной части Балтийского моря. — Рига: Зинатне, 1990, с. 65–74.
3. *Бибби К., Джонс М., Марсден С.* Методы полевых экспедиционных исследований. Исследования и учеты птиц. Пер. с англ. — М.: Союз охраны птиц России, 2000. — 186 с.
4. *Веревкин М.В., Сагитов Р.А.* Кольчатая нерпа в Финском заливе. // Мат. VII съезда териол. общ-ва. — М., 2003, с. 61.
5. *Веревкин М.В., Сагитов Р.А.* Серый тюлень в Финском заливе. // Мат. VII съезда териол. общ-ва. — М., 2003, с. 62.
6. *Веревкин М.В., Сагитов Р.А.* Морские млекопитающие. // Природная среда и биоразнообразие архипелага Березовые острова (Финский залив). — СПб.: изд-во НЦ РАН, 2007, с. 328–331.
7. *Кузьмин Г.В.* Фитопланктон. Видовой состав и обилие. В кн: Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. — М., 1975, с. 73–87.
8. *Ланге Е.К.* Оценка современного состояния фитопланктонных сообществ в Балтийском море. // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов Российских морей Северо-Европейского бассейна (проект подпрограммы «Исследование природы Мирового океана» федеральной целевой программы «Мировой океан»). КНЦ, Апатиты, 2007, вып. 2, с. 428–436.
9. *Ланге Е.К., Шилин М.Б.* Состояние планктонных сообществ Балтийского моря. // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов Российских морей Северо-Европейского бассейна (проект подпрограммы «Исследование природы Мирового океана» ФЦП «Мировой океан»). КНЦ, Апатиты, 2004, вып. 1, с. 222–228.
10. *Макарова С.В.* Видовой состав и количественные характеристики фитопланктона. // Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Ч. 2. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1997, с. 345–365.

11. *Максимов А.А.* Макрозообентос восточной части Финского залива. // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Ч. 2. Гидрометеорологические, гидрохимические, гидробиологические, геологические условия и динамика вод Финского залива. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1997, с. 405–416.
12. *Максимов А.А.* Многолетние изменения макрозообентоса как показатель эвтрофирования восточной части Финского залива. // Сборник научных трудов ГосНИОРХ, 2006, т. 1, вып. 331, с. 77–91.
13. *Максимов А.А.* Изменения в донных сообществах восточной части Финского залива после вселения полихеты Marenzelleria neglecta. // Российский журнал биологических инвазий, 2009, № 2, с. 14–22.
14. *Максимов А.А.* Крупномасштабная инвазия Marenzelleria spp. (Polychaeta, Spionidae) в восточной части Финского залива Балтийского моря. // Российский журнал биологических инвазий, 2010, № 4, с. 19–31.
15. *Мелентьев В.В., Черноок В.И., Мелентьев К.В., Алексеев В.А., Петтерсен Л.Х., Беднов П.В., Смирнова А.С., Андриевская Е.М., Труханова И.С.* Морские млекопитающие Финского залива и Ладожского озера в условиях антропогенного пресса и климатических изменений: опыт использования спутниковой РСА съемки и ГИС для совершенствования реабилитационных технологий. // Мат. 2 Международной научно-практической конференции «Геосистемы: факторы развития, рациональное природопользование, методы управления». — Туапсе: изд. Филиала ГОУ ВПО РГГМУ, 2011, с. 5–9.
16. *Орлова М.И., Анцулевич А.Е., Телеш И.В., Березина Н.А., Максимов А.А., Жакова Л.В., Литвинчук Л.Ф., Ковальчук Н.А., Костыгов А.Ю.* Методические рекомендации по сбору и обработке материалов по ведению мониторинга биологического загрязнения на Финском заливе. — СПб.: Зоологический институт РАН, 2005. — 68 с
17. *Равкин Ю.С., Челинцев Н.Г.* Методические рекомендации по комплексному маршрутному учету птиц. — М.: ВНИИ Природа, 1990. — 33 с.
18. *Погребов В.Б., Сагитов Р.А., Дмитриев Н.В., Шилин М.Б.* Природоохранный Атлас Российской части Финского залива. — СПб: Тускарора, 2006. — 60 с.
19. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. Под ред. Абакумова В.А. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. — 318 с.
20. *Чайковский А.* Методика учета размножения водоплавающих птиц, предложенная национальной службой охоты Франции с уточнениями, сделанными ОМРО. // Матер. I семинара по Прогр. «Изучение состояния популяций мигр. Птиц и тенденций их изменений в России». — М.-СПб., 1997, с. 94–101.
21. *Шилин М.Б.* На Балтику за тюленями. // Катера и яхты, 2011, № 3(231), с. 118–121.
22. *Шилин М.Б., Ланге Е.К.* Состояние планктонных сообществ Балтийского моря. // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов Российских морей Северо-Европейского бассейна (проект подпрограммы «Исследование природы Мирового океана» федеральной целевой программы «Мировой океан»). КНЦ, Апатиты, 2004, вып. 1, с. 222–228.
23. *Шишкин Б.А., Никулина В.Н., Максимов А.А., Силина Н.И.* Основные характеристики биоты вершины Финского залива и ее роль в формировании качества воды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 95 с.
24. *Ярвекюльг А.А.* Донная фауна восточной части Балтийского моря. — Таллин: Валгус, 1979. — 382 с.
25. *Eremina T., Lange E.* Estimation of changes in the ecosystem state from observations in the Gulf of Finland. // BFU Research Bulletin. — St. Petersburg: RSHU, 2003, № 6, pp. 15–19.
26. *Finni T., Kononen K., Olsonen R., Walström K.* The history of cyanobacterial blooms in the Baltic sea. // Ambio, 2001, vol. 30, № 4–5, pp. 172–178.
27. *Galtsova V., Nekrasov A., Kulangieva L., Plotnikov A., Spiridonov M., Nitishinsky M.* Underwater investigation of the coastlines and islands of the eastern Gulf of Finland. // BFU Research Bullewtin, 1996, № 2, pp. 27–35.
28. *Galtsova V.V., Starobogatov Y.I., Kulangieva L.V.* Results of hydrobiological investigations from theBFU cruises in the eastern Gulf of Finland in 1993–95. // Proceedins of the 14th Baltic Marine Biologists Symposium. — Tallinn: Estonian Academy Publishers, 1997, pp. 41–54.
29. HELCOM, Baltic Marine Environmental Protection Commission — Helsinki Commission Guidelines for the Baltic Monitoring Programme for the third stage; Part D. Biological Determinands, 27D, 1988. — 161 p.
30. *Kononen K.* Dynamics of the toxic cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. // Finn. Marine Research, 1992, 261, pp. 3–36.
31. *Kumari E.V.* Methods of Study of Visible Bird Migrations. // Tartu, 1979. — 29 p.
32. *Lange E.* Plankton algae in ecological mapping of the Gulf of Finland. // BFU Research Bulletin/UNESCO, 2008, № 10, pp. 28–32.
33. *Niemi A., Ray J.L.* Phytoplankton production in Finnish coastal waters. Report 2: Phytoplankton biomass and composition in 1973. // Meri, 1977, № 4, pp. 6–22.

О.М. Владимирова, С.В. Лукьянов, Н.А. Подрезова, В.А. Царев

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИДОННЫХ ВОД В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

O.M. Vladimirova, S.V. Lukyanov, N.A. Podrezova, V.A. Tsaryov

FEATURES OF BOTTOM WATER SPREADDING IN THE CENTRAL PART OF THE BALTIC SEA

Представлена негидростатическая модель распространения придонных вод в центральной части Балтийского моря. Обсуждаются результаты моделирования распространения поступающей из Слупского желоба придонной воды.

Ключевые слова: негидростатическая модель, придонные плотностные потоки, Балтийское море, бароклинные течения, водообмен, обновление вод.

Non-hydrostatic model of bottom water spreading in the central part of the Baltic Sea is represented. The modeling results of bottom water transport from Slupsk channel are discussed.

Key words: non-hydrostatic model, bottom density flows, the Baltic Sea, baroclinic currents, water exchange, waters apdate.

Введение

Поступление североморской воды в Балтийском море представляет собой важное звено в процессе водообмена. Под влиянием затока североморской воды происходит аэрация котловин, формирование фоновых полей солености и течений, устойчивости вертикального распределения плотности [15, 16]. Последние в значительной степени влияют на сезонные процессы, включая осенне-зимнюю конвекцию и вертикальные потоки тепла, а также на различные элементы экосистемы моря. Важность отмеченного процесса обусловила существенный интерес к его исследованию. Первые оценки объема поступающих в Балтийское море североморских вод были получены Кнудсеном, согласно которым их величина составляет 15 000 $м^3с^{-1}$. При этом Кнудсен использовал уравнения баланса массы и соли в целом для моря. Используя аналогичный подход, Омстед и Коутс [6] получили оценки объема поступления придонной воды для областей различных котловин. При этом они обнаружили, что объем поступления придонной воды увеличивается с удалением от внешних границ за счет вовлечения окружающей воды. Такие оценки носят климатический характер и не дают представлений об изменчивости поступления придонных вод. Первые исследования временной изменчивости затока североморских вод проводились для внешних проливов, включая Бельты и Зунд. Исходным материалом для исследований явились данные наблюдений за уровнем на прибрежных уровенных станциях и результаты измерений скоростей течений на плавмаяках. По результатам измерений расход в проливах определяется в основном разностью уровней в Каттегат и в Арконской впадине. Однако попытки

определения среднего расхода за период времени более месяца приводил к величине, близкой к нулю меняющей знак с увеличением периода осреднения. Это объяснялось ошибками, допускаемыми при измерении скоростей течений и при допущении, что поверхностная скорость течения соответствует средней скорости по сечению канала. Первые оценки временной изменчивости расхода придонных вод в Арконской впадине получил Стиджебрандт [9]. Он полагал, что придонная вода располагается в виде придонной линзы, в пределах которой вода, поступающая из Северного моря через проливы, распространяется геострофически в сторону пролива в Борнхольмскую впадину. В этом случае, принимая двухслойный характер распределения солености, удается связать расход придонной воды с толщиной придонного слоя и разностью плотности верхнего и нижнего слоев. Такие характеристики можно получить по данным вертикального распределения солености. Воспользовавшись длительным рядом съемок вертикального распределения солености в Арконской впадине на станции BY1, он получил оценки повторяемости интенсивности поступления придонных вод. По его оценкам, в частности, расходы воды, меньшие 30 000 $м^3с^{-1}$, характеризуются обеспеченностью 73 %. При этом могут отмечаться расходы порядка 100 000 $м^3с^{-1}$, но их повторяемость очень невысокая, составляя несколько процентов. Им же рассчитана повторяемость различных значений солености придонной воды в интервале 10–20 ‰. Он также отметил, что величина солености придонных вод связана с интенсивностью поступления североморской воды.

Первые измерения распространения придонных вод были проведены Уэлином на разрезе в Борнхольмском проливе. В течение ряда лет (с 1973 по 1977 г.) были проведены судовые измерения распределения на разрезе температуры, солености и скорости течений с интервалом примерно в один месяц. В интервалах между наблюдениями проводились наблюдения за течениями в помощью самописцев. По результатам измерений средний расход придонных вод составил 14 000 $м^3с^{-1}$. Придонная вода распространяется на разрезе в слое порядка 10 м преимущественно вдоль правого берега. Измеренная скорость течений менялась в интервале 20–0 см $с^{-1}$. Подобные измерения также проводил Rydberg L. в районе Слупского желоба в августе 1976 г.

Скорость распространения придонных вод исследовалась по результатам измерения временной изменчивости температуры, солености и содержания кислорода в придонном слое котловин. По данным наблюдений (Renk H) в период с ноября 1971 г.по февраль 1972 г. отмечалось увеличение солености придонных вод в Арконской впадине с 17 до 22 ‰, что было обусловлено усилением притока через проливы североморской воды. По оценкам объем поступившей за этот период воды составил 30 $км^3$. Вследствие этого затока в апреле отмечалось увеличение до 19 % придонных вод в Борнхольмской впадине. Соответствующее увеличение солености в придонном слое Гданьской впадины до 13 ‰ отмечалось в мае. Отмеченный характер распространения придонной воды подтверждается из сопоставления временной изменчивости температуры придонной воды. Так, в придонном слое в Борнхольмской котловине в начале апреля отмечалось понижение температуры до 3°. В Гданьской впадине понижение температуры придонных вод отмечалось в мае 1972 г. одновременно с повышением солености придонных вод. Синхронно с изменением отмеченных характеристик при прохождении придонных вод также происходило резкое увеличение концентрации

кислорода в придонной воде. В апреле 1972 г. в придонном слое Борнхольмской впадины, а в мае в Гданьской впадине отмечалось резкое увеличение концентрации растворенного кислорода соответственно до 8 и до 5 мг дм$^{-1}$. В предшествующий период отмечалось обеднение кислородом придонного слоя Борнхольмской и Готландской впадин и Слупского желоба с образованием сероводорода.

Как показывают наблюдения, распространение вод повышенной солености в придонном слое и вентиляция глубин в Балтийском море происходят в периоды значительного усиления затока североморских вод. Такие события, называемые большими или главными затоками происходят довольно редко. Чаще всего в период с августа по апрель. Хотя в период с 1897 по 1993 г. отмечалось около сотни таких затоков, они происходят нерегулярно, в результате чего процессы стагнации могут продолжаться более десяти лет. Последний заток произошел в январе 1993 г, чему предшествовал 16-летний период стагнации глубинных вод в центральной Балтике. Имеются результаты CTD измерений на заякоренных буевых станциях и на стандартных разрезах по тальвегу от порога Дарс до Готландской впадины при среднем расстоянии между зондированиями в 24 км. Кроме этого, известны результаты CTD измерений с горизонтальным разрешением 300–500 м, выполненные в период с 30 марта по 18 апреля на НИС «Профессор Штокман» в Слупском желеобе и в восточной части Готландского бассейна [1]. По результатам измерений, интесивное поступление североморских вод в Арконский бассейн происходил в период с 14 по 24 января 1993 г. При этом в Арконском бассейне за неделю изохалина 15 ‰ поднялась с глубины 38 до 10 м, а изохалина 20 ‰ — с 42 до 32 м. К середине февраля изохалины вновь вернулись на прежние глубины. Из Арконского бассейна придонная вода проникала в Борнхольмский бассейн. В результате этого соленость воды в придонном слое в период с января по март увеличилась с 15 до 20 ‰. Поступившая вода вытеснила старые придонные воды Борнхольмского бассейна на горизонты выше порога Слупского желоба (60 м). С начала марта начался перелив в Готландский бассейн. В начале апреля первые признаки обновления придонных вод были обнаружены в Готландской впадине, где за время с конца марта по июнь соленость на глубине 236 м повысилась с 11,0 до 11,7 ‰. В самом Слупском желобе вода с T-S характеристиками, соответствующими старым обновленным глубинным водам Борнхольмского басссейна, наблюдалась с марта по май. Ее поступление и перенос имели перемежающийся характер, о чем свидетельствовали обнаруженные изменения максимальной солености этих вод с характерным периодом в неделю. Согласно наблюдениям, на станции BY15 в Готландской впадине 21 апреля на глубинах более 100 м содержание кислорода было незначительным. При этом содержание сероводорода было низким у дна с увеличением на глубине 200 м. 4 июня повторные измерения показали наличие кислорода и полное отсутствие сероводорода во всей толще вод от поверхности до дна. В то же время в июне на станции BY15 в слое 130–195 м было зарегистрировано содержание сероводорода. Из этого делаются предположения, что за май 1993 г. произошла полная вентиляция всей толщи Готландской впадины, но не по всей акватории, а носила, вероятно, перемежающийся характер. В итоге до настоящего времени нет достаточных натурных сведений для составления надежных представлений о схеме распространения придонных плотностных потоков в Балтийском море.

К настоящему времени известна серия работ, в которых представлены модели общей циркуляции Балтийского моря [17, 18]. Существенно меньше моделей распространения придонной воды в Балтийском море. В работе [7] используется осредненная по площади котловины одномерная модель вертикальной циркуляции, связанной с затоком соленых вод. В ряде работ с помощью двухслойных моделей исследуется основной механизм формирования придонных плотностных течений в Борнхольмском проливе, обусловленных действием направленной вдоль дна неуравновешенной составляющей силы тяжести. При этом анализируется роль таких факторов, как придонное трение, инерция, сила Кориолиса. В работах [5, 8, 9] рассмотрена двухмерная негидростатическая модель придонных гравитационных течений, с помощью которой рассматривается процесс опускания придонной линзы в Готландской впадине. Из-за ее двухмерности и отсутствия учета силы Кориолиса возникают трудности применения модели к моделированию распространения придонных вод в море. Представленные модели внесли существенный вклад в понимание механизма придонных плотностных течений и позволили перейти к формулировке трехмерных математических моделей распространения придонной воды в Балтийском море. В известных по публикациям трехмерных моделях динамики Балтийского моря основное внимание уделяется трехмерной циркуляции вод. Исследования, направленные на моделирование непосредственно распространения придонных плотностных потоков в Балтийском море, практически отсутствуют. Целью данной работы является попытка изучения возможных особенностей распространения и трансформации поступающей через Слупский желоб и распространяющейся в придонном слое центральной части Балтийского моря воды повышенной солености.

При формировании придонных плотностных течений одной из основных вынуждающих сил является неуравновешенная составляющая силы тяжести [2, 3]. В связи с этим для их моделирования целесообразно использовать негидростатические модели, включающие уравнения движения в приближении Буссинска, уравнение неразрывности, уравнение переноса соли и уравнение состояния морской воды. Одним из способов решения данной системы уравнений является применение метода векторного потенциала [4]. При его использовании для вихревой составляющей скоростей течений исходные уравнения движения преобразуются в уравнения завихренности, векторного потенциала. В итоге получается следующая система уравнений:

$$\frac{\partial \Omega_x}{\partial t} + u\frac{\partial \Omega_x}{\partial x} + v\frac{\partial \Omega_x}{\partial y} + w\frac{\partial \Omega_x}{\partial z} = f_z\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{g}{\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} + k_z\frac{\partial^2 \Omega_x}{\partial z^2} + k_l\nabla^2\Omega_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Omega_y}{\partial t} + u\frac{\partial \Omega_y}{\partial x} + v\frac{\partial \Omega_y}{\partial y} + w\frac{\partial \Omega_y}{\partial z} = f_z\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} + k_z\frac{\partial^2 \Omega_y}{\partial z^2} + k_l\nabla^2\Omega_y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} + u\frac{\partial \Omega_z}{\partial x} + v\frac{\partial \Omega_z}{\partial y} + w\frac{\partial \Omega_z}{\partial z} = -(\Omega_z + f_z)\frac{\partial w}{\partial z} + k_z\frac{\partial^2 \Omega_z}{\partial z^2} + k_l\nabla^2\Omega_z, \quad (3)$$

$$\nabla^2\psi_x = -\Omega_x, \tag{4}$$

$$\nabla^2\psi_y = -\Omega_y, \tag{5}$$

$$\nabla^2\psi_z = -\Omega_z, \tag{6}$$

$$u = \frac{\partial\psi_z}{\partial y} - \frac{\partial\psi_y}{\partial z}, \tag{7}$$

$$v = \frac{\partial\psi_x}{\partial z} - \frac{\partial\psi_z}{\partial x}, \tag{8}$$

$$w = \frac{\partial\psi_y}{\partial x} - \frac{\partial\psi_x}{\partial y}, \tag{9}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x} + v\frac{\partial S}{\partial y} + w\frac{\partial S}{\partial z} = \left(\frac{\partial}{\partial z}k_{sz}\frac{\partial S}{\partial z}\right) + k_{sl}\nabla^2\Omega_x, \tag{10}$$

$$\rho = \rho_0 + \alpha_S S, \tag{11}$$

где u, v, w — составляющие скоростей течений вдоль осей x, y и z соответственно; Ω_x, Ω_y, Ω_z — составляющие завихренности; Ψ_x, Ψ_y, Ψ_z — составляющие векторного потенциала; S — соленость; ρ, ρ_0 — плотность и стандартная плотность морской воды; α_S — коэффициент халинного сжатия; g — ускорение свободного падения; f — параметр Кориолиса; k_z, k_1 — коэффициенты вектикальной и горизонтальной турбулентной вязкости; k_{Sz}, k_{S1} — коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии.

Для завихренности в качестве граничных условий используются следующие соотношения [3]:

$$\Omega_x = 0, \quad \Omega_y = 0, \quad \frac{\partial\,\Omega_z}{\partial\,z} = 0 \text{ — на морской поверхности,}$$

$$\Omega_x = -\frac{c_0\sqrt{u^2+v^2}}{k_z\rho_0}u, \quad \Omega_y = -\frac{c_0\sqrt{u^2+v^2}}{k_z\rho_0}v, \quad \frac{\partial\Omega_z}{\partial z} = -\frac{c_0\sqrt{u^2+v^2}}{k_z\rho_0}\Omega_z \text{ — на дне.}$$

Для векторного потенциала соответствующие граничные условия записываются в виде:

$$\Psi_x = 0, \quad \Psi_y = 0, \quad \frac{\partial \Psi_z}{\partial z} = 0 \text{ — для свободной поверхности и дна,}$$

$$\Psi_z = 0, \quad \Psi_l = 0, \quad \frac{\partial \Psi_n}{\partial z} = 0 \text{ — для боковой поверхности,}$$

где Ψ_l, Ψ_n — соответственно касательная и нормальная составляющие векторного потенциала.

Для солености на твердых боковых границах и на дне используется условие:

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0.$$

Для морской поверхности может использоваться такое же граничное условие или может задаваться соленость. На жидкой боковой границе обычно задается распределение солености.

Особенности распространения придонной воды в центральной части Балтийского моря

Для получения представлений о характере распространения соленой придонной воды в южной части Балтийского моря в период ее затока из Слупского желоба и ее последующей трансформации было проведено численное моделирование данного процесса с помощью представленной ранее модели. Расчеты проводились для прямоугольной области, расположенной в центральной части Балтийского моря, включающей Готландскую и Гданьскую впадины (рис. 1). Боковая граница рассматривалась как твердая, за исключением ее небольшого участка в районе расположения Слупского желоба, через который происходит заток придонной воды. Здесь в нижнем 10-метровом слое задавалась соленость 20 ‰, а выше 10 ‰. В качестве начальных условий задавалось однородное распределение солености, равной 10 ‰ и отсутствие начальной скорости течений. На свободной поверхности в течение всего периода расчетов сохранялась соленость 10 ‰, учитывая таким образом в первом приближении распресняющее влияние речного стока. Вертикальный и горизонтальный коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной вязкости принимались равными $k_z = 10^{-5}$ м^{2}с$^{-1}$, $k_l = 10$ м^{2}с$^{-1}$. Для коэффициентов вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии принимались следующие значения $k_{sz} = 10^{-4}$ м^{2}с$^{-1}$, $k_{sl} = 10$ м^{2}с$^{-1}$.

Задача решалась на сеточной области размером 49×103 узлов по горизонтали и 30 узлов по вертикали. Пространственные шаги по горизонтали составляли 2,5 км. В вертикальном направлении первые десять шагов от дна составляли 2 м, а выше равнялись (H − 20 м)/19, где H — общая глубина.

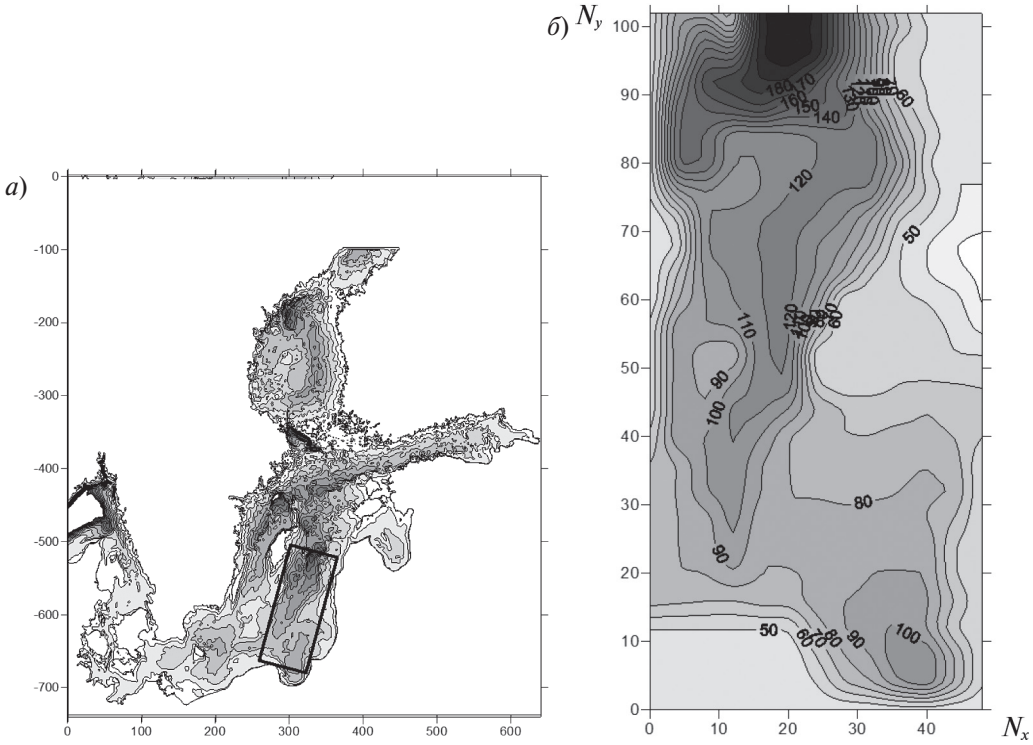

Рис. 1. Положение расчетной области (*а*) и используемое распределение глубины моря (*б*) (N_x, N_y — номера расчетных узлов по *x* и *y*)

Результаты моделирования

По расчетам придонная вода, поступающая в область через жидкую границу, вначале распространяется преимущественно вдоль изобат, достигая относительно мелководной области, разделяющей Готландскую и Гданьскую впадины. Здесь происходит разделение потока на две ветви (рис. 2*а*,*б*). С течением времени правая ветвь отклоняется в сторону Гданьской впадины, следуя в основном вдоль изобат и одновременно спускаясь в направлении наклона дна впадины (рис. 3), заполняет ее придонный слой. Максимальных глубин Гданьской впадины придонная вода достигает примерно за 10 суток. Данные наблюдений об изменении солености воды в придонном слое в Борнхольмской и Гданьской впадинах в период затока придонной воды в 1972 г. показывают, что продолжительность распространения придонной воды из Борнхольмской в Гданьскую впадину составляет примерно месяц. Учитывая, что до поступления в рассматриваемую область придонная вода проходит Слупский желоб, полученную из расчетов оценку времени достижения придонной водой Гданьской впадины можно признать вполне приемлемой. Левая ветвь распространяется по правому склону Готландской котловины, достигая ее

максимальных глубин примерно через 20 суток (рис. 3). По данным наблюдений, время распространения придонной воды из Слупского желоба в Готландскую впадину в период затока североморской воды в январе 1993 г. [15] оценивается в один месяц, что превышает полученное по расчетам. Возможно, это связано с тем, что в соленость поступающей воды при расчетах задавалась больше имеющей место при упоминаемом затоке.

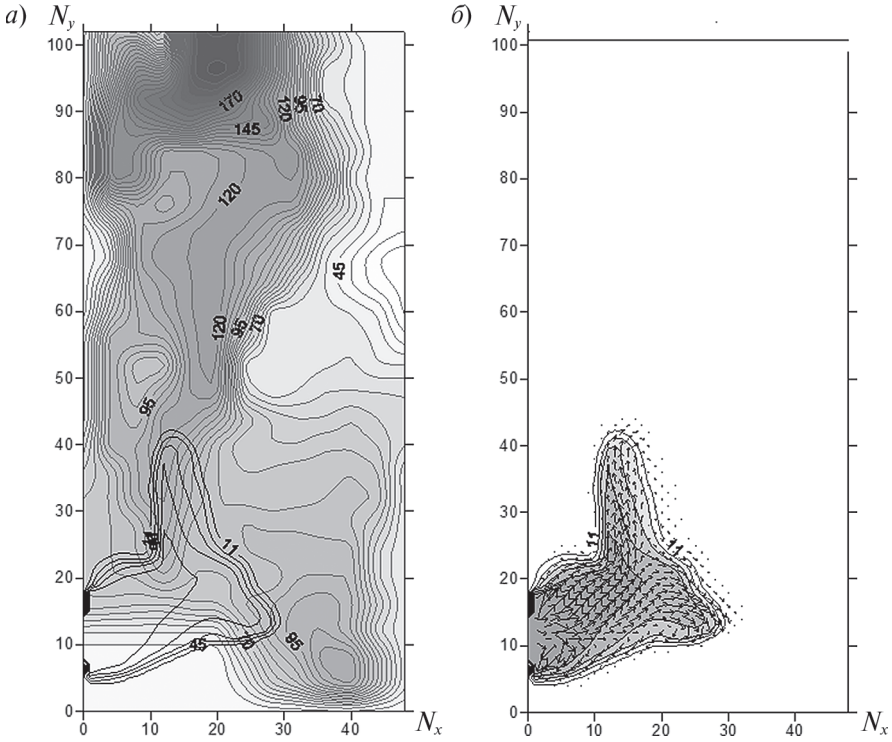

Рис. 2. Распределение придонной солености (*а*) и скорости придонных течений (*б*) через 3 суток

Распространение придонной воды в Готландской впадине происходит в придонном слое в виде относительно небольшого по ширине потока в области ее правого склона (рис. 4—6). После достижения области максимальных глубин происходит заполнение котловины и частичный переход придонной воды на ее левый склон. Ширина потока уменьшается на участках с увеличенным наклоном дна, при этом скорость придонных течений убывает. На участках с большим наклоном дна происходит уменьшение ширины потока и увеличение его скорости. Это легко можно отметить на рис. 3*а,б* при сопоставлении ширины потока и скорости течений на участках, соответствующих номерам узлов вдоль оси *y* 50, 70 и 90. Направление скорости придонных течений, представленных на рис. 3*б*, следует в основном направлению изобат, при этом их величина зависит от солености придонной воды и от наклона дна и составляет в

среднем 20 см с$^{-1}$, достигая 60 см с$^{-1}$. Увеличение скорости придонных течений происходит на участках, где отмечается увеличение наклона дна. Здесь также имеет место уменьшение ширины потока.

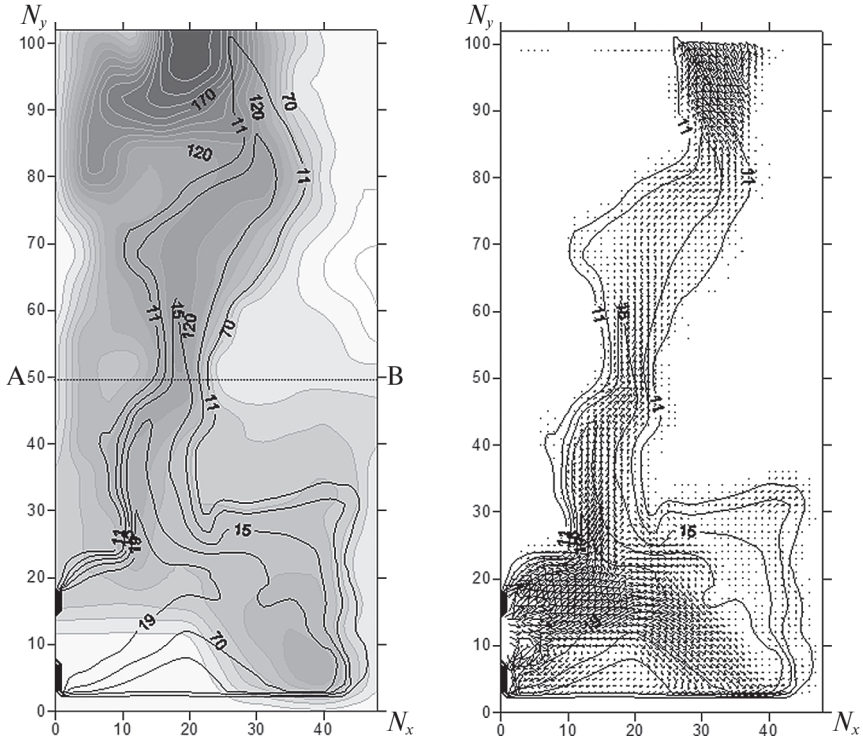

Рис. 3. Распределение придонной солености и скорости придонных течений через 20 суток

Представленное на рис. 4*а* распределение солености на поперечном сечении АВ, расположенном вдоль оси *x* от 50-го расчетного узла, показывает, что придонный плотностной поток локализуется, в основном, у правого склона Готландской котловины. В области расположения придонной воды локализуются наибольшие скорости направленных на север вдоль изобат течений (рис. 4*б*). В вышележащем слое формируются противоположно направленные течения, скорость которых в несколько раз ниже скорости придонных течений. Представленное на сечении распределение солености соответствует результатам наблюдений в Борнхольмском проливе, где отмечалось аналогичная особенность в расположении придонных вод.

После завершения поступления через границу придонной воды через 20 суток происходит исчезновение общего потока от границы. С течением времени формируются два локальных участка расположения придонной соленой воды, локализованных в Гданьской и Готландской котловинах (рис. 5).

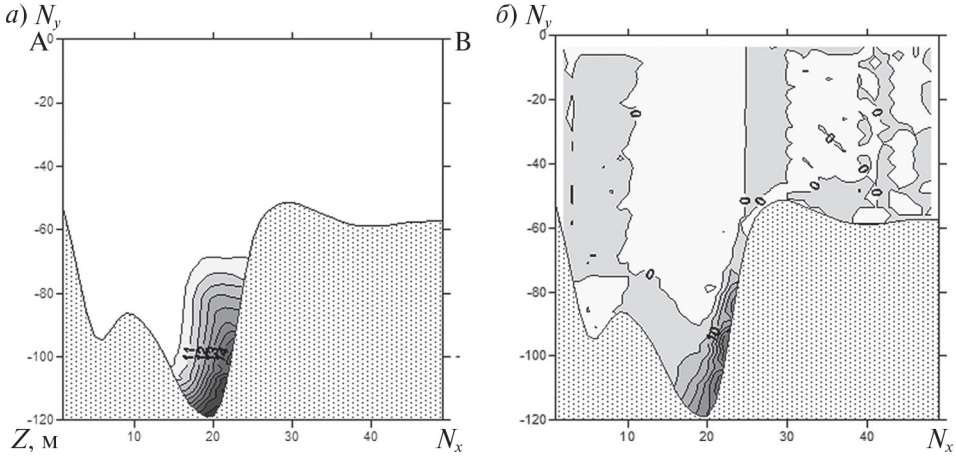

Рис. 4. Распределение солености (*а*) и продольной составляющей скорости на поперечном разрезе АВ (через 20 суток)

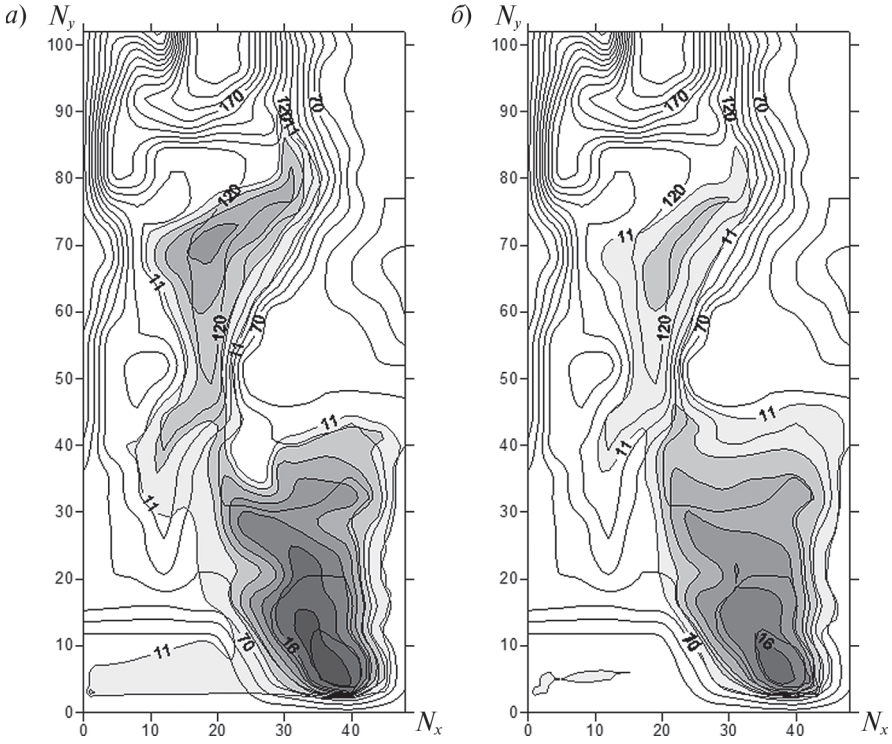

Рис. 5. Распределение придонной солености через 10 (*а*) и 20 (*б*) суток после прекращения притока через границу

Заключение

Приведенные в работе результаты моделирования дают представления о возможных особенностях распространения придонной воды в центральной части Балтийского моря. В частности, по расчетам, придонные воды распространяются в виде достаточно узкого потока вдоль правого склона Готландской и Гданьской котловин. При этом происходит разделение основного потока на две ветви, соотношение между интенсивностями которых зависит от особенностей рельефа дна в области водораздела. Показано, что распространение придонных вод сопровождается формированием противоположно направленных и обладающих меньшей скоростью течений в вышележащем слое. Соответствие известных натурных данных результатам моделирования позволяет надеяться, что используемая для расчетов модель в целом верно учитывает основные механизмы моделируемого процесса. При завершении притока придонной воды из Слупского желоба в Гданьской и Готланской впадинах формируются изолированные области придонных соленых вод.

Литература

1. *Журбас В.М., Пака В.Т.* Интрузионное расслоение галоклина в Готландском бассейне, обусловленное большим затоком североморских вод в Балтику в январе 1993 г. // Изв. РАН ФАО, 1997, т. 33, № 4, с. 549–551.
2. *Максименко Н.А., Зацепин А.Г.* О закономерностях опускания более плотных вод по гладкому склону океана. // Океанология, 1997, т. 37, № 4, с. 513–516.
3. *Подрезова Н.А., Царев В.А.* Эффекты негидростатичности в формировании распределения давления в окрестности плотностной линзы. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 29, с. 131–137.
4. *Царев В.А.* Теория и расчеты распространения придонных вод в море. — СПб.: РГГМУ, 2001. — 60 с.
5. *Gidhagen L., Hakansson B.* A model of the deep water flow into the Baltic Sea. // Tellus, 1992, vol. 44A, pp. 414–424.
6. *Kouts T., Omstedt A.* Deepwater exchange in the Baltic proper. // Tellus, 1993, vol. 45A, pp. 311–324.
7. *Omstedt A.* Modelling the Baltic Sea as thirteen sub-basines with vertical resolution. // Tellus, 1990, vol. 42A pp. 286–301.
8. *Stigebrant A.* A model for seasonal pycnocline in rotating systems with application to the Baltic proper. // J.Phys. Ocean, 1985, vol. 15, pp. 1392–1404.
9. *Stigebrandt A.* Computations of the flow of dense water into the Baltic Sea from hydrographical measurements in the Arkona Basin. // Tellus, 1987, vol. 39A, pp. 170–177.
10. *Stigebrandt A.* A model for the vertical circulation of the Baltic deep water. // J.Phys.Oceanogr., 1987, vol. 17, pp. 1772–1785.
11. *Flane-Serff G., Baines P.G.* Eddy formation by dense flows on slopes in a rotating fluid. // Journal of fluid mechanics, 1998, vol. 363, pp. 229–252.
12. *Swaters G.E.* Dynamics of radiating cold domes on a sloping bottom. // F.Fluid Mech., 1998, vol. 364, pp. 221–250.
13. *Nof D.* The translation of isolated cold eddies on a sloping bottom. // Deep-Sea Res., 1983, vol. 30, pp. 171–182.
14. *Smith P.C.* A streamtube model for bottom boundary currents in the ocean. // Deep-Sea Res., 1975, vol. 22, pp. 853–873.
15. *Matthaus W, Franck H.* Characteristics of major Baltic inflows — a statistical analysis. // Cont. Shelf Res., 1992, vol. 12(12), pp. 1375–1400.
16. *Feistel R., Nausch G., Matthaus W., Hagen E.* Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring 2003. // Oceanologia, 2003, vol. 45(4), pp. 623–642.
17. *Meier H.E.M., Doscher R., Faxen T.* A multiprocessor coupled ice-ocean model for the Baltic Sea: Application to salt inflow. // J.Geophys.Res., 2003, 108(C8), 3273 [doi: 10.1029/2000JC000521].
18. *Meier H.E.M., Doscher R., Broman B., Piechura J.* The major Baltic inflow in January 2003 and preconditioning by smaller inflows in summer/autumn 2002: a model study. // By Institute of Oceanology PAS. OCEANOLOGIA, 2004, 46(4), pp. 557–579.

О.М. Владимирова, В.А. Царев

РОЛЬ БАРОКЛИННЫХ ТЕЧЕНИЙ В РАСПРОСТРАНЕНИИ СЕВЕРОМОРСКИХ ВОД В АРКОНСКОМ БАССЕЙНЕ

O.M. Vladimiriva, V.A. Tsaryov

ROLE OF BAROCLINIC CURRENTS IN SPREADING OF THE NORTH SEA WATERS IN THE ARKONA BASIN

Представлена математическая модель формирования соленых придонных вод в Арконском бассейне при затоке в период нагона североморской воды. Модель включает систему нестационарных гидростатических уравнений, уравнение неразрывности, уравнение переноса соли и уравнение состояние. Моделируется приток соленой воды через пролив Зунд путем задания на границе с проливом периодического изменения расхода с периодом изменения 10 суток и солености воды 20 ‰ при начальной солености воды в Арконском бассейне 10 ‰.

Ключевые слова: Арконский бассейн, Балтийское море, придонная соленая вода, плотностные потоки, бароклинные течения, численная модель течений.

It is presented a mathematical model of the bottom saline water formation in the Arkona Basin during the North Sea water inflow. The model includes a system of hydrostatic equations of motion, the continuity equation, the transport equation and the equation of state.The salt water inflow through the Strait of Zund is modeled of by setting at the strait periodic changes in flow with a period of 10 days and water salinity of 20 ‰. The the initial salinity of the Arkona Basin is about 10 ‰.

Key words: Arkona Basin, Baltic Sea, bottom salt water, density flow, baroclinic currents, numerical flow model.

Введение

Динамика солености в Балтийском море в значительной степени связана с поступлением воды повышенной солености через Датские проливы [5]. Североморская вода поступает вначале в Арконский бассейн. Далее ее движение к центральной глубоководной части Балтийского моря происходит в виде последовательного заполнения цепочки связанных между собой котловин [4, 7]. На своем пути к глубоководной части моря происходит изменение солености придонных вод. В итоге, соленость приходящих в центральную часть моря придонных вод, их объем, а также глубина их распространения во многом определяются объемом их поступления в Арконскую впадину и степенью их трансформации протяжении их пути [1]. Первые исследования временной изменчивости затока североморских вод проводились для внешних проливов, включая Бельты и Зунд. Исходным материалом для исследований явились данные наблюдений за уровнем на прибрежных уровенных станциях и результаты измерений скоростей течений на плавмаяках. По результатам измерений расход в проливах характеризуется

значительной синоптической изменчивостью, обусловленной ветровыми нагонами в проливе Категат. Объем затока воды в период нагона может составлять сотни кубических километров и определяется в основном разностью уровней в Каттегат и в Арконской впадине. Однако попытки определения среднего расхода за период времени более месяца приводил к величине, близкой к нулю, меняющей знак с увеличением периода осреднения. Это объяснялось тем, что после затока следут соответствующий вынос воды из моря. При этом значительная часть соленой воды, поступающая при затоке, выносится из моря при смене направления расхода в проливах. При этом возникает вопрос о доли поступившей в период североморской воды, которая остается в Арконском бассейне после последовавшего выноса вод. Также важно представлять механизм, определяющий сохранение в Арконском бассейне таких вод. Первые оценки временной изменчивости расхода придонных вод в Арконской впадине получил Стиджебрандт [6]. Воспользовавшись длительным рядом съемок вертикального распределения солености в Арконской впадине на станции BY1, он получил оценки повторяемости интенсивности поступления придонных вод. По его оценкам, расходы воды, меньше 30 000 $м^3с^{-1}$, характеризуются обеспеченностью 73 %. При этом могут отмечаться расходы порядка 100 000 $м^3с^{-1}$, но их повторяемость очень невысокая, составляя несколько процентов. Им же рассчитана повторяемость различных значений солености придонной воды в интервале 10–20 ‰. Он также отметил, что величина солености придонных вод связана с интенсивностью поступления североморской воды. Однако в своих расчетах он использовал ряд допущений. Так, он полагал, что придонная вода располагается в виде придонной линзы, в пределах которой вода, поступающая из Северного моря через проливы, распространяется геострофически в сторону пролива в Борнхольмскую впадину. В этом случае, принимая двухслойный характер распределения солености, удается связать расход придонной воды с толщиной придонного слоя и разностью плотности верхнего и нижнего слоев. В настоящее время имеется возможность более детального рассмотрения процесса образования придонных соленых вод в Арконском бассейне, происходящего в результате периодических колебаний расходов через Датские проливы.

В данной работе с помощью численного моделирования исследуется процесс формирования придонной соленой воды в Арконском бассейне в результате периодического изменения расхода на границе с проливом Зунд. Поступление соленой воды происходит и через другие проливы. На данном этапе мы ограничили число источников поступления соленой воды с целью упрощения. Процесс заполнения котловины более соленой водой является негидростатическим [3] и в общем случае требует использования негидростатических уравнений движения. Однако при расположении вод повышенной плотности у наклонного дна формируется вертикальный градиент давления с горизонтальной составляющей, близкой по величине горизонтальной составляющей направленного вдоль наклона дна вектора превышения силы тяжести [2]. Это позволяет для описания рассматриваемого процесса воспользоваться системой гидростатических уравнений движения. Для описания динамики течений и процесса переноса соли использовались следующие уравнения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial u}{\partial z}\right), \qquad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial v}{\partial z}\right), \tag{2}$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z}, \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \tag{4}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x} + v\frac{\partial S}{\partial y} + w\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{sz}\frac{\partial S}{\partial z}\right) + K_l\left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}\right), \tag{5}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u\frac{\partial S}{\partial x} + v\frac{\partial S}{\partial y} + w\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{sz}\frac{\partial S}{\partial z}\right) + K_l\left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}\right), \tag{6}$$

где u, v, w — горизонтальные и вертикальная составляющие скорости; P — давление; ρ, ρ_0 — плотность и стандартная плотность воды соответственно; g — ускорение свободного падения; f — параметр Кориолиса; K_z, K_{sz} — коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости и диффузии соответственно; x, y, z — горизонтальные и вертикальная координаты соответственно; t — время; S — соленость; α — коэффициент халинного сжатия.

Предварительно исходная система преобразовывалась с использованием процедуры «спрямления дна». При преобразовании вводится новая вертикальная координата $\sigma = z/h$. При этом исходная система уравнений с учетом уравнения гидростатики в новой системе координат (x, y, σ, t) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0}\int_0^{\sigma}\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{h}\frac{\partial h}{\partial x}\frac{\partial \rho}{\partial \sigma}\right)d\sigma^* + \frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{h}\frac{\partial u}{\partial \sigma}\right), \tag{7}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -g\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0}\int_0^{\sigma}\left(\frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{h}\frac{\partial h}{\partial y}\frac{\partial \rho}{\partial \sigma}\right)d\sigma^* + \frac{1}{h}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{h}\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right), \tag{8}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\sigma}{h}\frac{\partial h}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\sigma}{h}\frac{\partial h}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{1}{h}\frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0. \tag{9}$$

При построении численного алгоритма на первом этапе рассчитывался уровень свободной поверхности. Далее по рассчитанному уровню находилось трехмерное распределение течений. На следующем шаге рассчитанные скорости течений использовались для расчета поля солености воды. Уравнения, необходимые для расчета уровня

свободной поверхности, получаются путем интегрирования в пределах толщины слоя уравнений движения (1)–(2) и уравнения неразрывности (4).

$$\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{\sigma}{h}\frac{\partial h}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial \sigma}+\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{\sigma}{h}\frac{\partial h}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial \sigma}+\frac{1}{h}\frac{\partial w}{\partial \sigma}=0. \tag{10}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+fU=-gh\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{gh^2}{\rho_0}\int_0^1(1-\sigma)\left(\frac{\partial \rho}{\partial y}-\frac{\sigma}{h}\frac{\partial h}{\partial y}\frac{\partial \rho}{\partial \sigma}\right)d\sigma+\tau_{0y}+\tau_{by}, \tag{11}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}=0, \tag{12}$$

где $V=h\int_0^1 v d\sigma$, $U=h\int_0^1 u d\sigma$.

При этом на твердых боковых границах используется условие непротекания. Для морской жидкой границы применяется условие излучения. Касательные напряжения трения на поверхности воды и у дна находятся из соотношений:

$$\left(\tau_{0x},\tau_{0y}\right)=c_0\rho_a\sqrt{u_a^2+v_a^2}\left(u_a,v_a\right), \tag{13}$$

$$\left(\tau_{bx},\tau_{by}\right)=c_0\rho_0\sqrt{u_0^2+v_0^2}\left(u_0,v_0\right), \tag{14}$$

где u_0, v_0 — составляющие скорости ветра; u_a, v_a — составляющие скорости придонных течений; ρ_a — плотность воздуха.

Горизонтальные составляющие скоростей течений рассчитываются из уравнения движения по найденному предварительно вертикальному распределению градиента давления за счет уклона уровня и плотностных градиентов. При этом уравнение движение для продольных составляющих скоростей течений записывается в комплексном виде. У дна горизонтальные составляющие скоростей течений принимаются равными нулю. Вертикальная составляющая скорости течений находится из уравнения неразрывности. Представленная модель использовалась для расчета в Арконском бассейне стоковых течений, обусловленных расходом воды на жидкой границе с проливом Зунд, и бароклинных течений, связанных с горизонтальной неоднородностью поля плотности, формирующейся при распространения соленой воды. Расчетная область включала Арконскую впадину (рис. 1*а*), характеризующуюся распределением глубины морского дна, представленным на рис. 1*б*. На боковой границе в области затока воды через пролив Зунд задавались скорости течений и соленость. На границе с Борнхольмским бассейном использовалось условие свободного излучения и условие отсутствия горизонтального турбулентного потока соли. Начальная соленость воды в расчетной области принималась равной 10 ‰. Соленость поступающей через пролив воды составляла 20 ‰. Изменение расхода задавалось в виде синусоиды с периодом 10 суток. Максимальная скорость

течений на границе соответствовала расходу через пролив, равному 100 000 $м^3с^{-1}$. В течение первых 5 суток происходит заток воды, а в течение последующего времени — вынос.

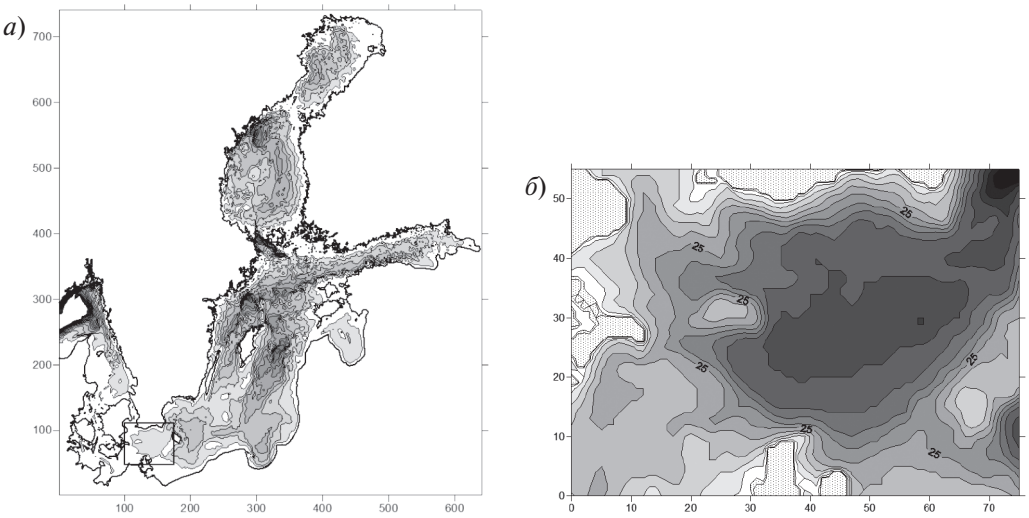

Рис. 1. Расположение расчетной области (*а*) и распределение глубины (*б*)

По расчетам максимальные скорости течений формируются вблизи пролива и убывают с удалением вглубь области. Течения на значительном расстоянии от границы сохраняют южное наравление с незначительным отклонением к центру области, совпадающее с напралением изобат. Наибольшие скорости течений отмечаются в мелководных районах. Относительно высокие скорости течений отмечаются также на мелководье в верхнем правом углу области в районе Борнхольмского пролива, где течения направлены в сторону пролива (рис. 2).

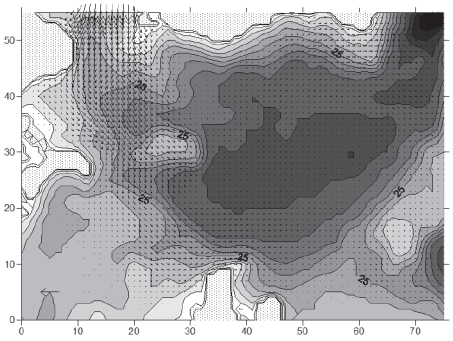

Рис. 2. Распределение скоростей течений, соответствующих моменту максимального затока через пролив Зунд (стрелка в левом нижнем углу скорость течений 100 $см·с^{-1}$. Изобаты проведены через 5 м)

Из-за медленного изменения расходов на границе характер распределения скоростей течений не менялся. Менялась лишь их величина. При изменении направления скоростей течений на противоположное скорости течений в области также меняли свое направление. Через двое суток под влиянием стоковых и бароклинных течений произошло продвижение придонных соленых вод в направлении стоковых течений (рис. 3*а*). Распределение придонной солености на этот же момент времени, полученный без учета бороклинных течений (рис. 3*б*) практически не отличается от предыдущего. Это говорит о том, что в начальный период затока соленых вод из пролива их распространение в области происходит в основном под влиянием стоковых течений. Влияние бароклинных течений на данном этапе незначительно. Это объясняется тем, что на незначителном расстоянии от пролива стоковые течения сохраняют значительную величину и превышают бароклинные течения.

С течением времени соленые придонные воды, удаляясь от пролива, попадают в область с меньшими скоростями стоковых течений. Это повышает относительную роль баролинных течений в переносе приднных соленых вод. Так, при сопоставлении распределений придонной солености, плученных с учетом бароклинных течений (рис. 4*а*) и без их учета (рис. 4*б*) на момент окончания затока через границу, соответствующий пятым суткам, можно отметить, что в первом случае размер области придонных солеых вод заметно больше.

При смене направления стоковых течений вначале их скорость остается незначительной. Однако к моменту 7,5 суток она достигает максимальных значений. Однако, несмотря на изменение направления стоковых течений в этот период, продолжается распространение придонных вод вглубь области (рис. 5*а*). По результатам расчетов, выполненных без учета бароклинных течений для данного перида отмечается вынос соленых вод (рис. 5*б*). Это подтверждает усиление роли бароклинных течений на процесс распространения придонных вод на этапе общего баротропного стока воды из Арконы.

На завершающем этапе периода стока область распространения придонных соленых вод не только не уменьшается, а даже возрастает (рис. 6*а*). В то же время при расчете соленоси без учета бароклинных течений придонная соленая вода по завершению периода стока практически полностью выносится (рис. 6*б*). Сохранившийся небольшой участок соленой воды около пролива обусловлен, вероятно, влиянием горизонтальной диффузии. То что в период возвратных стоковых течений придонные соленые воды не уходят со стоковыми течениями, объясняется тем, что по завершению затока придонные воды распространяются в область относительно слабых стоковых течений. Кроме этого, накопление придонных вод и увеличение толщины придонного слоя приводит к возрастанию бароклинных течений, способствующих дальнейшему переносу соленых вод вглубь области.

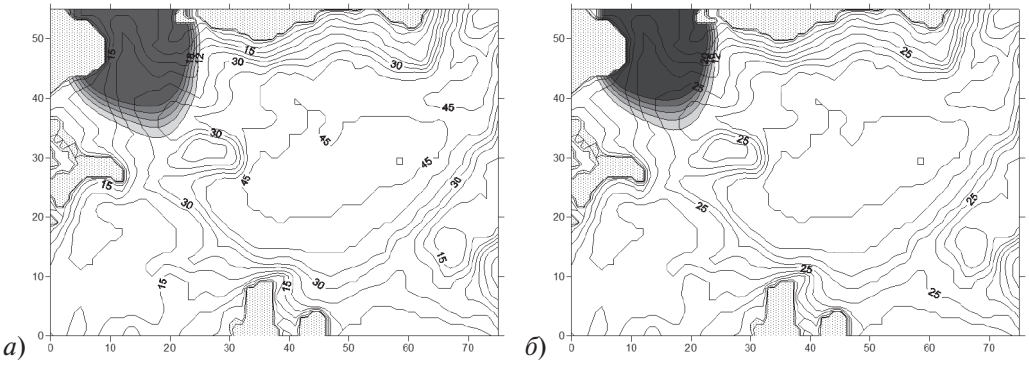

Рис. 3. Расределение прионной солености через 2 суток,
рассчитанные с учетом бароклинных течений (*а*) и без их учета (*б*)

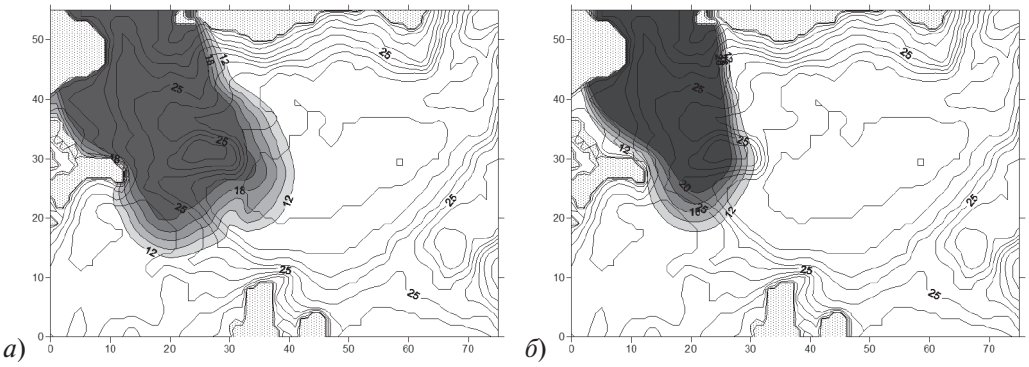

Рис. 4. Расределение прионной солености через 5 суток,
рассчитанные с учетом бароклинных течений (*а*) и без их учета (*б*)

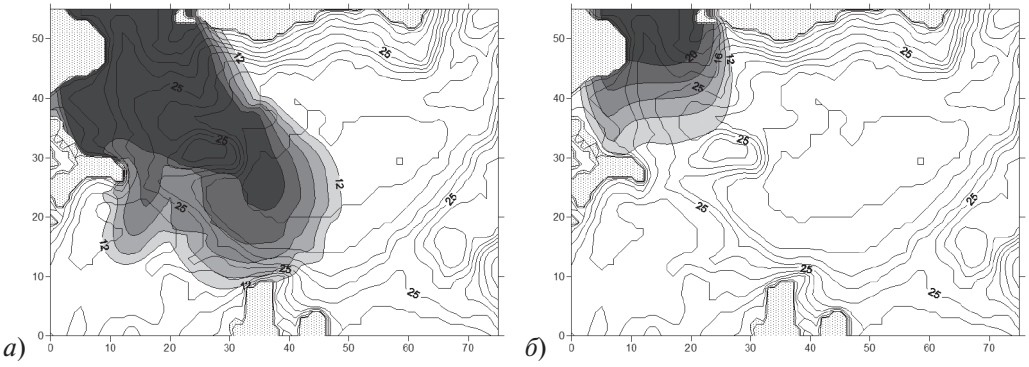

Рис. 5. Распределение придонной солености через 8 суток,
рассчитанное с учетом бароклинных течений (*а*) и без их учета (*б*)

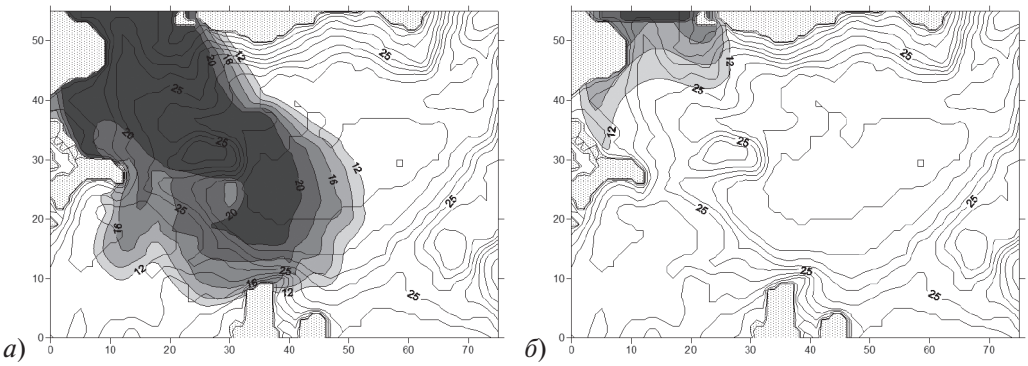

Рис. 6. Распределение придонной солености через 2 суток, рассчитанной с учетом бароклинных течений (*а*) и без их учета (*б*)

По результатам представленных результатов моделирования распространения придонной воды можно сделать следующие выводы о роли бароклинных течений в данном процессе. В окрестности пролива, где отмечаются максимальные стоковые течения, перенос соленых вод при затоке определяется в основном стоковыми течениями. В течение периода затока при удалении придонных вод от пролива происходит распространение придонных вод в центральную часть Арконского бассейна, где величина стоковых течений уменьшается. Это, а также увеличение толщины придонного слоя, связанное с накоплением соленых вод, приводит к возрастанию бароклинных течений относительно стоковых. Поэтому при смене знака стоковых течений не только не проиходит уменьшения размера области придонных вод, но даже отмечается ее некоторое увеличение.

Литература

1. *Журбас В.М., Пака В.Т.* Интрузионное расслоение галоклина в Готландском бассейне, обусловленное большим затоком североморских вод в Балтику в январе 1993 г. // Изв. РАН ФАО, 1997, т. 33. № 4, с. 549–551.
2. *Подрезова Н.А., Царев В.А.* Эффекты негидростатичности в формировании распределения давления в окрестности плотностной линзы. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 29, с. 131–137.
3. *Царев В.А.* Теория и расчеты распространения придонных вод в море. — СПб.: РГГМУ, 2001. — 60 с.
4. *Kouts T, Omstedt A.* Deepwater exchange in the Baltic proper. — Tellus, 1993, vol. 45A, pp. 311–324.
5. *Lehmann A., Myrberg K., Getzlaff K.* Salinity dynamics of the Baltic sea. // Baltic Earth Newsletter, 2013, № 1, pp. 3–5.
6. *Stigebrandt A.* Computations of the flow of dense water into the Baltic Sea from hydrographical measurements in the Arkona Basin. // Tellus, 1987, vol. 39A, pp. 170–177.
7. *Feistel R., Nausch G., Matthaus W., Hagen E.* Temporal and spatial evolution of the Baltic deep water renewal in spring 2003. // Oceanologia, 2003, № 45(4), pp. 623–642.

В.Н. Веретенников

РАЗНОСТНАЯ СХЕМА С НЕРАВНОМЕРНОЙ СЕТКОЙ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ ДЛИННОЙ ВОЛНЫ В БУХТЕ

V.N. Veretennikov

DIFFERENCE SCHEMES WITH NON-UNIFORM GRIG FOR CALCULATION OF WAVES OF WAVELENGTHS IN COVE

Разностная схема с неравномерной сеткой интерпретируется как схема с применением растяжения координат; это позволяет показать, что она имеет второй порядок точности. Эта схема используется для численного решения задачи расчета колебаний длиной волны в бухте, причем шаг сетки быстро меняется около побережья. При расчете распространения длиной волны в бухте хорошие результаты дает неравномерная сетка, в которой отношение двух соседних шагов сохраняет постоянное значение.

Ключевые слова: разностная схема, неравномерная сетка, длинная волна, теория мелкой воды, параметр Кориолиса, порядок точности, растяжение координат, ошибки аппроксимации, граничное условие, закон сохранения энергии, относительная погрешность.

Difference scheme with non-uniform grid is interpreted as a circuit using a stretching coordinates, it is possible to show that it has a second order accuracy. This scheme is used for the numerical solution of the problem of calculating oscillation wavelength in the bay, and the grid is changing rapidly near the coast. When calculating the propagation wavelength in the bay gives good results non-uniform grid in which the ratio of two adjacent steps is kept constant.

Key words: finite-difference scheme, a non-uniform grid, long wave theory of shallow water, the Coriolis parameter, the accuracy, stretching coordinate approximation error, the boundary condition, the law of conservation of energy, the relative error.

При численном решении двумерных задач для дифференциальных уравнений с частными производными, описывающих распространение длинных волн в областях со сложной геометрией, можно получить достоверный ответ только в том случае, если использовать алгоритмы, адаптирующиеся к картине движения волн. Процесс распространения двумерных волн в бассейне настолько сложен, что очень редко удается создавать его универсальную теорию, действующую на всех участках рассматриваемого процесса и в любой момент времени. Вместо этого можно посредством экспериментов постараться понять основные факторы, которые в тот или иной отрезок времени управляют процессом на том или ином участке.

Рассмотрим два бассейна, которые сообщаются друг с другом вдоль плоскости $y = 0$. Предположим, что глубина первого бассейна (океана) равна h_1, а глубина второго бассейна (бухты) равна h_2.

В рамках линейной теории мелкой воды распространение волн описывается системой уравнений соответственно для первого ($i = 1$) и второго ($i = 2$) бассейнов.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} - \ell v_i = -g\frac{\partial \varsigma_i}{\partial x}, \frac{\partial v_i}{\partial t} + \ell u_i = -g\frac{\partial \varsigma_i}{\partial y}, \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y} + \frac{1}{h_i}\frac{\partial \varsigma_i}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

где $u = u(x; y; t)$, $v = v(x; y; t)$ – скорости; $\varsigma(x; y; t)$ – превышение уровня жидкости над её равновесным положением; ℓ – параметр Кориолиса; g – ускорение свободного падения.

В качестве начальных данных выберем:

$$u = u^{(0)}(x; y), \quad v = v^{(0)}(x; y), \quad h = h(x; y) \text{ при } t = 0. \quad (2)$$

Функции $u^{(0)}$ и $v^{(0)}$ можно выбрать произвольно, лишь бы они были связаны зависимостью:

$$\frac{\partial u^{(0)}}{\partial x} + \frac{\partial v^{(0)}}{\partial y} = -\frac{1}{h}\frac{\partial \varsigma}{\partial t}.$$

Эти две системы уравнений объединяются граничными условиями, которые должны соблюдаться во всех точках оси Ox:

$$\varsigma_1(x; 0) = \varsigma_2(x; 0), \quad (3)$$

$$h_1(x; 0) \cdot v_1(x; 0) = h_2(x; 0) \cdot v_2(x; 0). \quad (4)$$

Необходимо задать граничное условие на фиктивной границе Γ_1 океана, проходя через которую волна не теряет энергию

$$h_1 \frac{\partial \varsigma_1}{\partial n} = q \quad \text{на участке } \Gamma_1 \text{ границы.} \quad (5)$$

Экономичная разностная схема (схема расщепления, основанная на одномерной неявной схеме), эффективно реализуемая на ЭВМ, для аналогичной задачи была построена в работе [1]. Особенностью этой работы было использование неравномерной пространственной сетки. Это связано с необходимостью повышения точности, для чего, например, имеет смысл дробить сетку вблизи берегов.

Способ построения сетки с переменным шагом, использованный в работах [1, 2, 3] является типичным для конечно-разностных схем, применяемых для расчета около побережья. В этом способе берется слабо меняющийся шаг сетки и поэтому требуется несколько сотен узлов перпендикулярно береговой черте. Цель данной статьи — показать, что разностная схема типа Кранка-Николсона с аналитически задаваемым расположением узлов сетки имеет тот же порядок точности и является более эффективной. Пусть узлы сетки расположены поперек береговой черте с переменным шагом, т.е. $hx_{i+1} = hx_1 + \Delta hx_{i+1/2}$, где $hx_1 = 0$ и $1 \leqslant i \leqslant n - 1$. В уравнения входят первые производные, которые нужно представить в конечно-разностном виде.

В настоящей разностной схеме с неравномерной сеткой используется подход, основанный на растяжении координат. Вводится новая координата ξ, для которой шаг сетки $\Delta\xi$ постоянен и которая связана с координатой hx соотношением вида:

$$hx_i = hx(\xi), \quad 1 \le i \le n. \tag{6}$$

Выражение для первой производной, включающее первый член ошибки аппроксимации записывается для новой координаты с применением центральных разностей:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i = \left(\frac{\partial u/\partial \xi}{dx/d\xi}\right)_i = \frac{\left(u_{i+1} - u_{i-1}\right)}{2\Delta\xi\left(dx/d\right)_i} + O\left(\Delta\xi^2\right). \tag{7}$$

Это выражение для производной можно использовать при решении основных уравнений, записанных для переменной ξ, причем $dx/d\xi$ находится из соотношения (6). В настоящем подходе производную $dx/d\xi$ нужно заменить конечно-разностным выражением:

$$\left(\frac{dhx}{d\xi}\right)_i = \frac{hx_{i+1} - hx_{i-1}}{2\Delta\xi} + O\left(\Delta\xi^2\right). \tag{8}$$

Подставляя формулу (8) в (7), получаем следующее разностное выражение:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial hx}\right)_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{hx_{i+1} - hx_{i-1}} + O\left(\Delta\xi^2\right).$$

Приведённое выражение показывает, что данная схема с неравномерной сеткой эквивалентна растяжению координат, проводимому по соотношению вида (6). Это соотношение используется для определения переменного шага в настоящей схеме и в то же время даёт связь между координатами при растяжении. Производные имеют второй порядок точности относительно шага Δξ.

Для случая сетки с переменным шагом, заданным формулой:

$$\Delta hx_{i+\frac{1}{2}} = \eta \Delta hx_{i-\frac{1}{2}}, \quad 1 \le i \le n-1,$$

где $\eta = 1 + O(\Delta hx_{i-1/2})$, соотношение (6) можно взять в виде:

$$hx_i = hx_i \frac{\eta^{\xi_i/\Delta\xi_0} - 1}{\eta^{1/\Delta\xi_0} - 1}, \quad 1 \le i \le n,$$

где $\xi_i = (i - 1)\Delta\xi$ и $\xi_n = 1$. Два параметра η и $\Delta\xi_0$ выбираются таким образом, чтобы получить желаемое расположение узлов.

Отсюда видно, что величина шага должна меняться медленно с тем, чтобы разностное выражение для первой производной ***локально*** сохраняло точность второго порядка.

Можно рассмотреть установившиеся колебания волны в бухте, которые описываются уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h_i\frac{\partial \varsigma_i}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h_i\frac{\partial \varsigma_i}{\partial y}\right)+k^2h_i\varsigma_i=0, \tag{9}$$

с граничным условием (5), где k – волновое число.

Высоту волны представим в виде суммы трёх составляющих:

$$\varsigma_2=\varsigma_H+\varsigma_{\text{O}}+\varsigma_{\text{P}}, \tag{10}$$

где $\varsigma_H=\varsigma_1$ – высота набегающей волны; ς_{O} – высота отраженной волны, получаемая при отражении плоской волны от береговой линии; ς_{P} – высота рассеянной волны, возникающей внутри бухты.

Высоту набегающей волны представим следующим образом:

$$\varsigma_H=a\cdot\exp\left(-ikr\cos\left(\theta-a\right)\right). \tag{11}$$

Известно, что поле рассеянных волн ς_{P} будет перемещаться из входа в бухту к границе Γ_1. Это обстоятельство можно описать условием излучения Зоммерфельда на границе, которое можно представить в приближенной форме:

$$\frac{\partial \varsigma_{\text{P}}}{\partial r}+ik\varsigma_{\text{P}}=0 \quad \text{на участке } \Gamma_1 \text{ границы.} \tag{12}$$

Используя условие (11), для суммарной высоты ς можно записать:

$$\frac{\partial \varsigma}{\partial r}+ik\varsigma=\frac{\partial\left(\varsigma_H+\varsigma_{\text{O}}\right)}{\partial r}+ik\left(\varsigma_H+\xi_{\text{O}}\right)=f. \tag{13}$$

В правой части этого уравнения находится известная функция f координат, угла, определяющего локальную геометрию, и угла набегания волны ς_H.

Включая это граничное условие в общую формулировку вариационного типа:

$$\int\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(h\frac{\partial \varsigma}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\frac{\partial \varsigma}{\partial y}\right)+k^2h\varsigma\right)\varsigma^*d\Gamma=$$
$$=\int_{\Gamma_1}\left(h\frac{\partial \varsigma}{\partial n}-q\right)\varsigma^*d\Gamma_1+\int_{\Gamma_2}h\left(\frac{\partial \varsigma}{\partial n}+ik\varsigma-f\right)\varsigma^*d\Gamma_2. \tag{14}$$

Откуда, интегрируя по частям, получаем:

$$\int_{\Gamma}\left(h\frac{\partial \varsigma}{\partial x}\frac{\partial \varsigma^*}{\partial x}+h\frac{\partial \varsigma}{\partial y}\frac{\partial \varsigma^*}{\partial y}-kh\varsigma\varsigma^*\right)d\Gamma=$$
$$=\int_{\Gamma_2}q\varsigma^*d\Gamma_2+\int_{\Gamma_1}h(f-ik\varsigma)\varsigma^*d\Gamma_1. \tag{15}$$

Это исходное соотношение, связанное с применением конечных элементов, в котором учтено граничное условие (12) на участке Γ_1 границы.

Численное интегрирование исходной системы проводилось на равномерной и неравномерной сетке, покрывающей прямоугольную область. Численные эксперименты на неравномерной сетке были проведены при следующих значениях параметров: $hx = hy = 4$ км для левой и $hx = hy = 2$ км для правой половины бухты $\tau = \{30, 60, 120, 240$ с$\}$, $h_1 = 20$ м, $h_2 = 10$ м, без учета и с учетом параметра Кориолиса. Анализ разностного аналога интегрального закона сохранения энергии для равномерной сетки показал, что изменение энергии так мало под влиянием свободных колебаний, что нет необходимости проводить расчет свыше полных 150 временных интервалов. В качестве «главного счета» для сравнения с последующими экспериментами на неравномерной сетке необходимо брать результаты расчета с параметрами $hx = hy = 1$ км, $\tau = 60$ с.

Для неравномерной сетки разделяющая линия помещена посередине сеточной области. Сеточные точки составляют 151 узел против 800 в главном счете. Энергия в этом случае согласуется со значениями энергии главного счета. Поля уровня на неравномерной сетке с учетом и без учета параметра Кориолиса достаточно хорошо совпадают между собой и с главным счетом.

Результаты расчета с переменной глубиной показали, что на разделяющей линии возможны «скачки» уровня и скорости. Для ослабления этого эффекта желательно выбирать шаги сетки hx_i и hx_{i+1} так, чтобы было выполнено условие $hx_i/\sqrt{gh_1} \approx hx_{i+1}/\sqrt{gh_2}$. В тех случаях, когда это удаётся сделать, указанный эффект скачков уровня и скорости практически удаётся устранить, что свидетельствует о повышении точности схемы на разделяющей линии. Отметим, что наибольших значений относительная погрешность (до 4 %) достигает на границе области, где больше пространственный шаг сетки, в основном же она колеблется в пределах до 1 %.

Литература

1. *Веретенников В.Н.* Численное моделирование длинных волн типа цунами в прямоугольной области. — В кн.: Распространение и набегание на берег волн цунами. — М.: Наука, 1981, с. 139–146.
2. *Веретенников В.Н.* Построение разностной схемы для численного расчета распространения волн цунами на произвольном множестве расчетных точек. Теоретические и экспериментальные исследования длинноволновых процессов. // Институт морской геологии и геофизики. — Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985, с. 115–121.
3. *Нгуен Хонг Лан, Плинк Н.Л.* Численная модель для расчета штормовых нагонов и цунами в Южно-Китайском море с использованием системы криволинейных координат. //ч Ученые записки РГГМУ, 2005, № 1. — 200 с.

МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ

Н.В. Чернова

КРАТКИЙ ОБЗОР ИХТИОФАУНЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

N.V. Chernova

FISH FAUNA OF THE GULF OF FINLAND, SHORT REVIEW

Приводится обзор видового разнообразия ихтиофауны Финского залива с учетом инвазивных видов и номенклатурных изменений. Отмечены тенденции изменений ихтиофауны в связи с воздействием ключевых природных и антропогенных факторов. В связи с тем, что в условиях возрастающего антропогенного пресса на экосистему Финского залива выделяемые для компенсации рыбохозяйственных потерь значительные объемы денежных средств не приводят к увеличению рыбных запасов, актуальность изучения ихтиофауны значительно возрастает.

Ключевые слова: ихтиофауна, Балтийское море, Финский залив, климатические факторы, антропогенная нагрузка, инвазивные виды, осетр, сиг, акула.

Fish diversity of the Gulf of Finland is discussed; new invasive species and taxonomic changes are noted. The trends of ichthyofauna change are revealed in relation to influence of key natural and anthropogenic factors. Large financial compensation of fishery losses does not reach the result. Because of the increasing of anthropogenic influence on the ecosystem of the Gulf of Finland, the relevance of fish fauna study increases.

Key words: fish fauna, the Baltic Sea, Gulf of Finland, climatic factors, anthropogenic press, invasive fishes, sturgeon, white fish, shark.

Разнообразие ихтиофауны

Ихтиофауна Финского залива насчитывает 75 видов из 32 семейств, зарегистрированных в морских водах (табл. 1) [7, 20, 29]. В это число входят морские и проходные (анадромные и катадромные) рыбы, а также рыбы пресноводного комплекса, выходящие в слабо соленые воды; небольшую группу составляют разноводные рыбы, размножающиеся и в пресной, и в морской воде. Наиболее многочисленна салака, дающая 66–72 % уловов по Финскому заливу. Далее, в порядке убывания в уловах, следуют килька (шпрот) (около 8,2 %), корюшка (8,1 %), ерш (6,9 %), плотва (0,95 %), судак (0,6 %), лещ (0,8 %), окунь (0,54 %), речная минога (0,24 %), ряпушка (0,2 %), сиг (0,04 %), лосось, кумжа, щука, сырть, налим, угорь, треска, речная камбала. Значительная часть остальных видов — редкие гости в Финском заливе, лишь изредка заходящие из открытых вод Балтики. В прибрежной зоне (в уловах неводом) обычны уклейка, пескарь, окунь, плотва, трехиглая колюшка [42].

Таблица 1

Виды рыб, зарегистрированные в восточной части Финского залива

	Русское название	Латинское название	Экологическая группа	Встречаемость	Красные книги	Источники
	Миноговые	**Petromyzontidae Bonaparte, 1831**				
1	Речная (невская) минога	*Lampetra fluviatilis* (Linnaeus, 1758)	а			7, 35, 36
2	Морская минога	*Petromyzon marinus* (Linnaeus, 1758)	а	р	РФ, ЛО, СПб, Бал	7, 17, 18, 19
	Осетровые	**Acipenseridae Bonaparte, 1831**				
3	Острорылый осетр	*Acipenser oxyrinchus* (Mitchill, 1815)	а	и	РФ, ЛО, СПб, IUCN, Бал	7, 18
	Угревые	**Anguillidae Rafinesque, 1810**				
4	Европейский речной угорь	*Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758)	к		Бал	7, 35, 36
	Сельдевые	**Clupeidae Cuvier, 1816**				
5	Сельдь-финта	*Alosa fallax* (Lacepede, 1800)	а	р	РФ, ЛО	7, 19
6	Балтийская сельдь, или салака	*Clupea harengus membras* (Linnaeus, 1758)	м			7, 35, 36, 41
7	Балтийская килька, шпрот	*Sprattus sprattus balticus* (Schneider, 1904)	м			36, 41
	Анчоусовые	**Engraulidae Th.N. Gill, 1861**				
8	Анчоус	*Engraulus encrasicholus* (Linnaeus, 1758)	м	р		7
	Карповые	**Cyprinidae Rafinesque, 1815**				
9	Лещ	*Abramis brama* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41, 42
10	Синец	*Abramis ballerus* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36
11	Быстрянка	*Alburnoides bipunctatus* (Bloch, 1782)	п	м/р		29
12	Уклея	*Alburnus alburnus* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41, 42
13	Жерех	*Aspius aspius* (Linnaeus, 1758)	п	м/р	ЛО, СПб	7, 17, 18
14	Густера	*Blicca bjoerkna* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41, 42
15	Золотой, или обыкновенный карась	*Carassius carassius* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36
16	Серебряный карась*	*Carassius gibelio* (Bloch, 1782)*	п			7, 29, 42

	Русское название	Латинское название	Экологическая группа	Встречаемость	Красные книги	Источники
17	Карп	*Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36
18	Пескарь	*Gobio gobio* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41, 42
19	Верховка	*Leucaspius delineates* (Heckel, 1843)	п			42
20	Язь	*Leuciscus idus* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41
21	Елец	*Leuciscus leuciscus* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41, 42
22	Чехонь	*Pelecus cultratus* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36
23	Гольян	*Phoxinus phoxinus* (Linnaeus, 1758)	п			29
24	Плотва	*Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41
25	Красноперка	*Scardinius erythrophthalmus* (Linnaeus, 1758)	п			42
26	Голавль	*Squalius cephalus* (Linnaeus, 1758)	п	м/р	ЛО, СПб	17, 18, 35, 36, 42
27	Линь	*Tinca tinca* (Linnaeus, 1758)	п			7, 20
28	Рыбец, или сырть	*Vimba vimba* (Linnaeus, 1758)	п		СПб	35, 36, 41
	Вьюновые	**Cobitidae Fitzinger, 1832**				
29	Вьюн	*Misgurnus fossilis* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36
	Балиторовые	**Balitoridae Swainson, 1839**				
30	Усатый голец	*Barbatula barbatula* (Linnaeus, 1758)	п			7, 35, 36
31	Обыкновенная щиповка	*Cobitis taenia* (Linnaeus, 1758)	п			7, 42
32	Горчак	*Rhodeus sericeus amarus* (Bloch, 1782)	п		ЛО, СПб	17, 18, 29
	Сомовые	**Siluridae Rafinesque, 1815**				
33	Сом	*Silurus glanis* (Linnaeus, 1758)	п	м/р	ЛО, СПб	7, 17, 18, 35, 36
	Корюшковые	**Osmeridae Regan, 1913**				
34	Корюшка	*Osmerus eperlanus* (Linnaeus, 1758)	а			29, 41
	Сиговые	**Coregonidae Bonaparte, 1844**				
35	Ряпушка	*Coregonus albula* (Linnaeus, 1758)	а			41, 51
36	Сиг-марена	*Coregonus maraena* (Bloch, 1779)	а	с	СПб, Бал	7; 32, 41

Продолжение таблицы 1

	Русское название	Латинское название	Экологическая группа	Встречаемость	Красные книги	Источники
	Хариусовые	**Thymallidae Th.N. Gill, 1885**				
37	Европейский хариус	*Thymallus thymallus* (Linnaeus, 1758)	п	м/р, с	РФ, Бал	35, 36
	Лососевые	**Salmonidae Latreille, 1825**				
38	Атлантический лосось	*Salmo salar* (Linnaeus, 1758)	а	с	Бал	7, 35, 36
39	Кумжа	*Salmo trutta* (Linnaeus, 1758)	а	с	РФ, ЛО, СПб, Бал	7, 35, 36
	Щуковые	**Esocidae Rafinesque, 1815**				
40	Щука	*Esox lucius* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36
	Тресковые	**Gadidae Rafinesque, 1810**				
41	Четырехусый морской налим	*Enchelyopus cimbrius* (Linnaeus, 1758)	м	р		7
42	Балтийская треска	*Gadus morhua callarias* (Linnaeus, 1758)	м			35, 36
43	Атлантическая треска	*Gadus morhua morhua* (Linnaeus, 1758)	м			7
44	Налим	*Lota lota* (Linnaeus, 1758)	м			29
	Кефалевые	**Mugilidae Cuvier, 1829**				
45	Кефаль	*Liza ramada* (Risso, 1826)	м	р		7
	Саргановые	**Belonidae Bonaparte, 1836**				
46	Морская щука	*Belone belone* (Linnaeus, 1758)	м	р		7
	Колюшковые	**Gasterosteidae Bonaparte, 1831**				
47	Трехиглая колюшка	*Gasterosteus aculeatus* (Linnaeus, 1758)	раз			35, 36, 41, 42
48	Девятииглая колюшка	*Pungitius pungitius* (Linnaeus, 1758)	раз			35, 36, 41, 42
49	Морская колюшка	*Spinachia spinachia* (Linnaeus, 1758)	м	р		7
	Игловые	**Syngnathidae Bonaparte, 1831**				
50	Змеевидная морская игла	*Nerophis ophidion* (Linnaeus, 1758)	м	р		7, 42
51	Морская игла	*Syngnathus typhle* (Linnaeus, 1758)	м	р		7
	Керчаковые	**Cottidae Bonaparte, 1831**				

	Русское название	Латинское название	Экологическая группа	Встречаемость	Красные книги	Источники
52	Европейский речной бычок (подкаменщик)	*Cottus gobio* (Linnaeus, 1758)	п		РФ, ЛО, СПб	17, 18, 19, 35, 36, 42
53	Европейский керчак	*Myoxocephalus scorpius* (Linnaeus, 1758)	м			15, 41
54	Европейский бычок-буйвол	*Taurulus bubalis* (Euphrasen, 1768)	м	р		7
55	Четырехрогий бычок рогатка	*Triglopsis quadricornis* (Linnaeus, 1758)	раз			36, 41
	Круглоперые	**Cyclopteridae Bonaparte, 1831**				
56	Пинагор	*Cyclopterus lumpus* (Linnaeus, 1758)	м			15
	Липаровые	**Liparidae Th.N. Gill, 1861**				
57	Балтийский липарис	*Liparis barbatus* (Ekström, 1832)	м	р		47, 41, 54
	Окуневые	**Percidae Rafinesque, 1815**				
58	Ерш	*Gymnocephalus cernuus* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41, 42
59	Окунь	*Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41
60	Судак	*Stizostedion lucioperca* (Linnaeus, 1758)	п			35, 36, 41, 42
	Бельдюговые	**Zoarcidae Swainson, 1839**				
61	Бельдюга	*Zoarces viviparus* (Linnaeus, 1758)	м			35, 36, 41
	Стихеевые	**Stichaeidae Th.N. Gill, 1864**				
62	Миноговидный люмпен	*Lumpenus lampretaeformis* (Walbaum, 1792)	м			7
	Маслюковые	**Pholidae Th.N. Gill, 1893**				
63	Маслюк	*Pholis gunnelus* (Linnaeus, 1758)	м	р		7
	Песчанковые	**Ammodytidae Bonaparte, 1837**				
64	Европейская малопозвонковая песчанка	*Ammodytes tobianus* (Linnaeus, 1758)	м			7, 15
65	Большая песчанка	*Hyperoplus lanceolatus* (Le Sauvage, 1824)	м			36
	Головешковые	**OdontobutidaeHoese et Gill 1993**				
66	Ротан*	*Perccottus glenii* (Dybowski, 1877)*	п			29, 42, 63
	Бычковые	**Gobiidae Fleming, 1822**				

Продолжение таблицы 1

	Русское название	Латинское название	Экологическая группа	Встречаемость	Красные книги	Источники
67	Черный бычок	*Gobius niger* (Linnaeus, 1758)	м	р		7
68	Бычок-кругляк*	*Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814)*	раз			42
69	Обыкновенный бычок-лысун	*Pomatoschistus microps* (Krøyer, 1838)	м	р		7, 42
70	Малый бычок-бубырь	*Pomatoschistus minutus* (Pallas, 1770)	м			7, 42
71		*Proterorhinus sp.**				42
72	Белоперый пескарь*	*Romanogobio albipinnatus* (Lukasch, 1933)*				42
	Скумбриевые	**ScombridaeRafinesque, 1815**				
73	Скумбрия	*Scomber scombrus* (Linnaeus, 1758)	м	р		7
	Камбаловые	**Pleuronectidae Rafinesque, 1815**				
74	Балтийская речная камбала	*Platichthys flesus* (Linnaeus, 1758)	м			7, 41
	Ботусовые	**Bothidae Smitt, 1892**				
75	Тюрбо	*Rhombus maximus* (Linnaeus, 1758)	м	р		7

Экологические группы: а — анадромный; к — катадромный; м — морской; п — пресноводный; раз — разноводный. Встречаемость (по умолчанию — обычный): и — практически исчезнувший; м/р — в морских опресненных водах редок; р — редкий; с — сокращающийся по численности. Красные книги: РФ — Российской Федерации; ЛО — природы Ленинградской области; СПб — Санкт-Петербурга; Бал — Балтики [57]; IUCN — Международного союза охраны природы [58]. * — вид-вселенец. Семейства перечислены по системе Нельсона [30]; сиговые и хариусовые принимаются в ранге семейств. Авторы семейств приводятся по работе Б.А. Шейко [48].

Салака (*Clupea harengus membras*). В восточной части Финского залива обитает весенненерестующая салака локальной популяции [53]. Распространена она в водах с соленостью выше 2 ‰. Зимой концентрируется в районах о-вов Мощный, Большой и Малый Тютерсы, Гогланд и в Нарвском заливе, в придонных водах на глубинах 40–60 м. Весной (в мае-июне) подходит к берегам для нереста. В июне-июле основная масса салаки сосредоточена в районах нерестилищ в Нарвском заливе, Лужской и Копорской губах, у островов Мощный, Малый, Сескар до линии мыс Устинский — мыс Стирсудден. Скопления салаки в июне отмечаются в Выборгском заливе и р-не Бьерке-Зунд — Сестрорецк. В осеннее время салака широко распределяется по заливу, на запад от изогалины 2,5–3,0 ‰, проходящей по линии мыс Шепелевский — мыс Стирсудден; в наибольших количествах встречается в районе о-вов Сескар, Малый, Мощный, Тютерс, Нарва, Соммерс, в Нарвском заливе. Промысел ведется у берегов ставными орудиями лова и сетями на нерестовых подходах (весной), а также в открытом море тралами (в течение всего года).

Балтийская килька, или **шпрот** (*Sprattus sprattus balticus*) в Финском заливе по северному берегу встречается на восток до Бьёркё, по южному — до Шепелева. Осенью обильна у Лавенсари, у о. Гогланд. Промысловый лов (летом и осенью) развит в Нарвской губе.

Корюшка (*Osmerus eprlanus*) представлена в Финском заливе двумя группировками: «невская» корюшка, более многочисленная, нерестится в Неве, Невской губе и прилегающих к ней опресненных районах; «финская» корюшка нерестится в опресненных районах устьев других рек, впадающих в залив. Корюшка подходит к берегам весной, с конца апреля. В начале мая нерестится во впадающих в залив реках. Молодь составляет основу речного питания лососевых рыб. В июле молодь выносится из рек в приустьевые пространства, где концентрируется в придонных слоях воды. В летний период основные скопления корюшки сосредоточены в Нарвском и Выборгском заливах, в Лужской губе, в районах островов Мощный, Сескар. В осенний период держится более разреженно. Корюшка — одна из важнейших промысловых рыб Финского залива, объект любительского рыболовства.

Балтийская треска, балтийская речная камбала и европейский речной угорь собственно в Финском заливе ловятся в незначительных количествах и не являются объектами специального промысла.

Речная, или **невская минога** (*Lampetra fluviatilis*). Встречается в прибрежной зоне Финского залива. Входит для нереста в большом количестве в реки Нарову, Лугу, Коваш, Неву и др. Морской период жизни плохо изучен. Отмечена у о. Гогланд на глубине 45 м.

Атлантический лосось (*Salmo salar*), после исчезновения балтийского осетра, представляет собой одну из наиболее ценных рыб Финского залива. Нарвский залив, Лужская и Копорские губы — места нагула и зимовки взрослых рыб и их молоди. В настоящее время лосось водится в трех реках Ленинградской области — Неве, Луге и Нарове [33, 46]. До 1960-х гг. небольшое количество лосося заходило в р. Черная и Систа. Нарвская, лужская и невская популяции лосося существуют исключительно за счет искусственного воспроизводства. Луга — единственная река Ленобласти, где возможно еще происходит естественное воспроизводство лосося (притоки Вруда и

Лемовж). Лужский лосось считался наиболее крупным в Балтике: в 30-е гг. обычная его длина в уловах составляла 85–105 см, причем преобладали рыбы весом 7–13 (в среднем 9,9) кг, а отдельные особи имели вес 21–23 кг. Осенью 1998 г. в районе г. Кингисепп был пойман лосось весом 24 кг. Большая часть лосося вылавливается бесконтрольно. В начале XXI века численность производителей лосося р. Нева оценивалась в 750–800 экземпляров [27]. За период 2000-2001 гг. общий вылов лосося в Финском заливе тремя странами (Россией, Швецией и Финляндией) уменьшился в 3,8 раза — с 38821 до 10285 штук [46].

Кумжа (*Salmo trutta*). Наибольшие для Финского залива размеры имеют особи лужской популяции. Средняя длина кумжи в Лужской губе составляет 45–52 см, средний вес — 1,0–2,2 кг, максимальный — 5,2 кг. Ежегодно в р. Лугу заходит на нерест несколько сот особей кумжи; из реки в море скатывается примерно 8000 покатников [6]. Молодь кумжи, после миграции из рек, распространяется вдоль береговой линии.

Среди морских рыб массовыми и экологически значимыми (как звенья пищевых цепей) являются бельдюга (*Zoarces viviparus*), четырехрогий бычок рогатка (*Triglopsis quadricornis*), европейская малопозвонковая песчанка (*Ammodytes tobianus*), колюшки.

Рыбы пресноводной группы обитают в прибрежных опресненных водах: судак, щука, елец, густера, чехонь, красноперка, язь, сырть, гольян, пескарь, уклейка и некоторые другие. Нерестятся эти рыбы обычно в мае-июне, в прибрежной зоне среди высшей водной растительности и в реках, впадающих в Финский залив.

Помимо обычной фауны, в восточной части Финского залива единично встречаются рыбы ряда «чужеродных» видов. Одну группу составляют особи, вероятно ушедшие из садков рыбоводных хозяйств; это осетровые *Acipenseridae* — стерлядь *Acipenser ruthenus* [16], сибирский осетр *A. baeri* [7], севрюга *A. stellatus* [3], русский осетр *A. guldenstadti* [2], горбуша *Oncorhynchus gorbuscha* [3], кижуч *O. kisutch* [25], стальноголовый лосось *Parasalmo mikiss* [2]; сиговые *Coregonidae* — пелядь *Coregonus peled*, чир *C. nasus*, муксун *C. muksun* (*Coregonidae*) [35, 36]; чукучановые *Catostomidae* — чукучан *Catostomus catostomus* [35, 36]. Вторую группу составляют инвазивные виды, попавшие в бассейн Финского залива при непреднамеренной акклиматизации или в результате расширения ареала; это ротан *Perccottus glenii* (семейство Головешковые *Odontobutidae*), успешно натурализовавшийся в прибрежных водах Финского залива [5], а также белопёрый пескарь *Romanogobio albipinnatus* из семейства карповых *Cyprinidae* и бычковые (*Gobiidae, Benthophilinae*): бычок-кругляк *Neogobius melanostomus* и «тупоносый бычок *Proterorhinus sp.* из комплекса, ранее известного как *P. marmoratus*» [42]

К балтийским эндемичным формам относятся салака, шпрот, балтийская треска, балтийская речная камбала. Реликт ледникового времени — четырехрогий бычок рогатка.

Ряд редких и исчезающих видов рыб, обитающих в Финском заливе, включены в Красные книги: Российской Федерации [19], Ленинградской области [17], Санкт-Петербурга [18] Балтики [56], Международного союза охраны природы [58].

Состав ихтиофауны не остается стабильным. Регистрируются новые инвазивные виды (перечислены выше). Происходят изменения номенклатуры. Так, малотычинковый морской сиг из Балтийского моря считался типичной формой обыкновенного сига [8]. Однако недавно был обозначен неотип *Coregonus lavaretus* (MHNG 2583.51), и происходит он из оз. Бурже (Франция), расположенного в бассейне Средиземного

моря [60]. Западноевропейские ихтиологи теперь считают распространение *C. lavaretus* локальным, и балтийских сигов к этому виду не относят. Малотычинковых морских и озерно-речных сигов из бассейна Балтийского моря объединяют в вид *C. maraena*; сиг-марена был описан из оз. Маде (Made) в Померании (ныне оз. Miedwie в Польше) [60]. Эту точку зрения можно не принимать, но с ней приходится считаться: *C. maraena* вошел в последние сводки HELCOM [56, 57] и списки краснокнижных видов Балтики [58].

Локальные популяции сига островов открытой части залива, как полагают, имеют гибридное (с арктическим омулем *Coregonus autumnalis*) происхождение и, как считают, могут представлять собой неописанный вид [37].

Изменилось понимание видовой принадлежности балтийского осетра: согласно молекулярно-генетическим данным, обитавший в Балтике на протяжении, по крайней мере, трех тысяч лет *Acipenser sturio* в период 1200–800 лет назад был замещен острорылым осетром *A. oxyrinchus* [59, 61]. Последний в настоящее время встречается только у атлантических берегов Америки, но ранее обитал и у европейских берегов (бассейн Северного моря) симпатрично с *A. sturio* [55]. Эта точка зрения успела укорениться в европейской литературе: в сводках по Балтике *A. sturio* заменен на *A. oxyrinchus* [56, 57]. Два вида отличаются структурой жучек [61]. Что касается Ладожского озера, то осетра, обитавшего здесь 3 тыс. лет назад, относят к виду *A. sturio* [61]; другие данные по этому вопросу мне не известны.

Не все сенсационные находки подтверждаются. Черноперая акула *Carcharhinus limbatus* из семейства серых акул *Carcharhinidae*, «выловленная» в мае 2007 г. в р. Нева, на самом деле была доставлена в Санкт-Петербург в замороженном виде на праздник корюшки (по сообщению имевших к этому отношению лиц сотрудникам Зоологического института РАН). Шуткой следует считать и апрельское (2012 г.) сообщение в интернете о поимке двух акулят на зимней рыбалке в районе Калининграда.

Тенденции изменений ихтиофауны

В Невской губе, по сравнению с данными 1960-х гг., видовое разнообразие рыб существенно не изменилось (встречается около 40 видов) [27]. На фоне происходящего в последние десятилетия опреснения Балтики, перестали встречаться или сократили численность виды морского комплекса (треска, пинагор, морская игла). Усиливаются признаки эвтрофикации водоема. Негативная тенденция состоит в нестабильности воспроизводства корюшки, ряпушки и трехиглой колюшки, играющих ведущую роль в пищевых цепях. На грани исчезновения находится проходной сиг. Условия для нагула пелагических и размножения псаммофильных рыб становятся хуже. Адекватная кормовая база для смолтов лосося в Невской губе отсутствует.

Промысел и уловы

Финский залив до последнего времени оставался продуктивным промысловым районом Балтийского моря; общий вылов рыбы в 1967–1974 гг. составлял 24–43,4 тыс. т, годовая продукция достигала 40 кг/га [39]. Промысел охватывал

15–20 видов. За последние десятилетия среднегодовые уловы рыбы в восточной части Финского залива значительно сократились: в 1981–1985 гг. они составляли 21,9 тыс. т, в 1986–1990 гг. — 20,9, в 1991–1995 гг. — 15 тыс. т [21]. К 2000 г. уловы снизились в полтора раза, а за период с 2000 по 2012 г. сократились еще в 3 раза: с 10,5 до 2,8 тыс. т (табл. 2). Сокращение уловов коснулось основных промысловых рыб Финского залива.

Таблица 2

Динамика вылова рыбы в восточной части Финского залива, т [31]

Годы	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Вылов, т	10495	10195	9302	6205	2856	2228,6	3414,8
Годы	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Вылов, т	4452,8	3986,6	6454,5	4960	1715,5	2813,4	-

Салака. В Финском заливе ведется траловый и прибрежный ее промысел. Устойчивые скопления, пригодные для тралового облова, салака образует в западных районах залива, на участке от морской государственной границы на западе до линии м. Курголовский — о. Мощный — о. Сескар — м. Крестовый на востоке. Прибрежный лов салаки приурочен к условной линии м. Шепелевский — м. Флотский (за исключением опресненных районов Выборгского залива). Вылов салаки в Финском заливе за период с 1993 по 2003 г. сократился почти в 2 раза: с 9,4 тыс. т до 4,27 тыс. т. (табл. 3).

Таблица 3

Динамика вылова салаки в Финском заливе (32 промысловый подрайон), т [31]

Промысел/годы	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Траловый	8518	6057	8351	5775	6683	5789	5907	6430	5925	5562	3359
Прибрежный	874	1161	823	999	665	1009	443	579	729	616	915
Всего:	9392	7218	9174	6774	7348	6888	6350	7009	6654	6178	4274

Шпрот. В Финском заливе ведется траловый и прибрежный промысел, основанный на его скоплениях в районе от морской госграницы с Эстонией до о-ва Б. Тютерс. Уловы шпрота в Финском заливе в период с 1995 по 2003 г. не уменьшились (табл. 4).

Таблица 4

Уловы шпрота в Финском заливе (32 промысловый подрайон), т [31]

Годы	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Уловы, т	527	831	999	1141	1216	1975	1760	1426	678

Уловы рыб пресноводного комплекса, а также корюшки и миноги, напротив, показывают тенденцию к значительному сокращению (табл. 5).

Таблица 5

Среднегодовые уловы рыб и миноги в восточной части Финского залива, т [26]

Виды	1972–1984	1985–1989	1996–2000	2001–2003
Минога	52	47	12	21
Корюшка	1902	3100	650	453
Лещ	371	489	161	182
Плотва	362	417	100	128
Ерш	1500	632	238	312
Судак	222	210	46	38
Окунь	176	218	78	121
Колюшка	1804	3080	146	221
Общий вылов	**6682**	**8264**	**1463**	**1520**

Падение уловов рыбы связывают с общим уменьшением продукционного потенциала Балтийского моря [31]. Последний процесс обусловлен воздействием природных и антропогенных факторов.

Ключевые природные факторы

Климатические факторы на северо-западе России за столетний период (с 1854 по 2010 г.) показывают наличие циклов с периодами 2–3 года, 6 лет и ~70 лет [44]. Многолетние изменения климатических факторов опосредованно связаны с колебаниями активности солнца. Циклически изменяющиеся факторы среды (температурный режим, продолжительность вегетационного периода, объем речного стока и др.) оказывают влияние на состояние рыбных ресурсов. Это исследовано на примере уловов пресноводных рыб крупных озер Северо-Запада (Псковско-Чудское, Ильмень, Белое, Ладожское) [9]. Зависимые от климатических факторов полициклические колебания уловов выявлены и для анадромных рыб (атлантический лосось Баренцева и Белого морей) [44]. Указанная закономерность справедлива также для морских видов. Для Балтийского моря среди природных факторов, определяющих уровень промысловых запасов рыбы, ведущее значение имеет гидравлическая связь его с Атлантическим океаном [4]. Многолетние циклы опреснения и осолонения климатически обусловлены; поступление более соленых и холодных североморских вод определяет экологическое состояние глубинных участков Балтики, что в свою очередь оказывает влияние на эффективность воспроизводства балтийской трески и состояние кормовой базы салаки. В результате долгопериодные (около 60 лет) колебания величины уловов этих рыб оказываются сопряжены с климатическими факторами [4, 22]. В течение 80-х гг. XX в. Балтийское море вступило в очередную фазу опреснения, что сопровождается пониженной биопродуктивностью его открытых вод. Длительную депрессию запаса балтийской трески и салаки связывают с резким сокращением притока соленых североморских вод в котловины Балтийского моря через проливы [1, 23]. Численность шпрота (объекта питания трески и пищевого конкурента салаки) находится в противофазе с состоянием запаса последних. Таким

образом, наблюдавшееся за последние десятилетия резкое снижение уловов трески и салаки и рост уловов шпрота связаны не столько с антропогенными факторами, сколько с долгопериодными изменениями природной среды в Северо-Восточной Атлантике [22].

С другой стороны, уловы рыб пресноводного комплекса восточной части Финского залива (леща, плотвы, корюшки, ерша) в находятся в противофазе с показателями среднемесячной температуры воды за апрель, а уловы судака и окуня — в прямой связи со среднемесячными расходами воды р. Нева в мае [14].

Условия внешней среды особенно воздействуют на рыб в первый год их жизни. Для ряпушки показано, что начало вегетационного периода, его продолжительность, суммы положительных температур воды за период откорма, колебания уровня воды определяют время ската, выживаемость, сроки активного питания, темп роста сеголеток [11]. От гидрометеорологических условий года зависят пищевой спектр и интенсивность питания ее молоди ряпушки, что определяет физиологическое состояние рыб и величину ее запаса [13]. Промысловый возврат сига-пыжьяна коррелирует с суммой среднемесячных температур воды в летний период на первом году жизни [34]. Для развития кормовой базы молоди лосося и хариуса в реках благоприятны средние и теплые по сумме тепла годы [38].

Для морских рыб термический режим моря в весенний период (когда происходит выклев личинок, и они наиболее чувствительны к резким изменениям внешней среды) является ведущими в формировании урожайности поколений. Так, урожайные поколения баренцевоморской наваги формируются в годы с теплой весной; связь между температурой воды и уловами наваги наблюдается через время, равное возрасту полового созревания [40]. Формирование поколений чешско-печорской сельди находится в прямой зависимости от степени весеннего прогрева вод; зависимость между величиной ее уловов и солнечной активностью прослежена на протяжении пяти ее циклов [40]. Гидрологические характеристики (термика, солевой режим, речной сток) оказывают прямое воздействие на воспроизводство наваги, корюшки, камбалы, ряпушки, нельмы [10].

В эстуарных районах климатически обусловленные колебания стока пресных вод заметно отражается на сиговых рыбах, нагульные площади которых в этой зоне сопряжены с водными массами определенной солености [28].

Ключевые антропогенные факторы

Связанная с хозяйственной деятельностью нагрузка на восточную часть Финского залива огромна. Следует различать прямое воздействие антропогенных факторов на ихтиофауну (усиление пресса промысла) и косвенное, обусловленное изменениями режима водоема. Прямое влияние промысла на ихтиофауну Финского залива заметно сказалось в XX в. (перепромысел балтийского осетра, лосося). В последние десятилетия на первый план выходят косвенные воздействия. Основными источниками воздействий являются: гидротехнические работы при создании комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений, поступление городских стоков, добыча нерудных материалов, расширение и углубление судоходных каналов, намыв территорий, морские подводные отвалы (у маяка Толбухин и др.), многократное увеличение

интенсивности судоходства, строительство портовых сооружений (Усть-Луга, Высоцк) [49, 50]. Перечисленные работы производятся в прибрежной части залива, где расположены нерестилища рыб, места нагула молоди, а также рыбопромысловые участки. Так, в результате гидротехнических работ на Лахтинских отмелях было утрачено до 40 % площадей нерестилищ [52]. Строительство дамбы затруднило условия миграции рыб к местам размножения в Невской губе и Неве. В результате дноуглубительных работ на акватории Санкт-Петербургского порта произошло вторичное загрязнение прилегающей морской акватории. Строительство портового комплекса в бухте Батарейная привело к утрате части нерестилищ салаки. При реконструкции порта г. Высоцк потеряны нерестилища и места нагула рыбы на прилегающих акваториях. В Усть-Луге утрачены нерестилища салаки, места нагула молоди, вследствие негативного влияния на миграции лосося и кумжи снизилась эффективность Лужского рыбоводного завода [52]. Углубление судоходного фарватера с применением взрывных работ приводит к глушению рыбы, потере нерестилищ и мест нагула. Многократное увеличение объемов судоходства усиливает фактор беспокойства морской биоты, увеличивает загрязнение среды. Вследствие изменений гидрологических параметров снижается продуктивность планктона и бентоса — кормовой базы рыб [24]. Комплексное воздействие совокупности факторов имеет кумулятивный эффект.

Для компенсации рыбохозяйственных потерь при проведении хозяйственных работ в Финском заливе выделяются значительные объемы денежных средств (5–10 млн руб. ежегодно) [52]. Несмотря на это, увеличения рыбных запасов, адекватного наносимому ущербу, не происходит. Это объясняют 1) отсутствием учета кумулятивного эффекта от воздействия ряда разнородных проектов; 2) неэффективностью использования выделяемых средств; 3) несовершенством используемой методики оценки ущерба рыбным запасам [52]. Предложены меры, позволяющие исправить положение: проведение мелиорации на Южной Лахтинской отмели и создание искусственных нерестилищ может улучшить условия размножения рыб; поддержание работы водопропускных отверстий в северном крыле защитной дамбы может способствовать доступу рыбы к нерестилищам в Невской губе; искусственное разведение лососевых и сиговых в питомниках и на рыбозаводах может поддержать их численность [26].

Литература

1. *Алексеев А.П.* К вопросу о причинах многолетней изменчивости уловов рыбы в Балтийском море. // Тез. докл. VI Международного экологического форума «День Балтийского моря». — СПб.: Издательский дом Герда, 2005, с. 241–242.
2. *Анацкий С.Ю.* Рыбы-вселенцы бассейна Финского залива Балтийского моря. // Тез. докл. Научн. Семинара, г. Мурманск, 27–28 января 2000 г. — Мурманск, 2000, с. 12–14.
3. *Анацкий С.Ю., Кудерский Л.А., Неелов А.В., Чмилевский Д.А.* Круглоротые и рыбы Ленинградской области. // Труды С.-Петербургского общ-ва естествоиспытателей. Серия 6. Т. 2. Биоразнообразие Ленинградской области (Водоросли. Грибы. Лишайники. Мохообразные. Беспозвоночные животные. Рыбы и рыбообразные). — Спб.: изд-во Санкт-Петербургского университета, 1999, с. 397–425.
4. *Антонов А.Е.* Крупномасштабная изменчивость гидрометеорологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987. — 248 с.
5. *Анцулевич А.Е.* Дополнительно о видах-вселенцах в Финском заливе. // Тез. докл. Международного экологического форума «День Балтийского моря». — СПб., 2004, с. 30–31.

6. *Барабанова М.В.* Современное состояние популяции кумжи (Salmo trutta L.) реки Луги. // 6-я международная конференция и выставка AQUATERRA. — СПб., 2003, с. 59.
7. *Берг Л.С.* Рыбы Финского залива. // Изв. Всесоюзн. НИИ озерн. и речн. рыбн. х-ва, 1940, т. 23, с. 3–46.
8. *Берг Л.С.* Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. 4-е изд. — М.-Л.: Изд-во АН СССР. Ч. 1, 1948. — 468 с., 287 рис. (Определители по фауне СССР, издаваемые Зоологическим институтом АН СССР. Т. 27).
9. *Бессонов Н.М.* О причинах многолетней цикличности промысловой продукции крупных озер Северо-Запада СССР. // Десятая сессия Ученого совета по пробоеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Декабрь 1977 г. Тез. докл. Сыктывкар, Коми фил. АН СССР, 1977, с. 78–79.
10. *Залесских Л.М.* Особенности гидрологического режима Печорской губы и их значение в жизни рыб. // Природная среда и биологические ресурсы морей и океанов. Тез. докл. Всесоюзн. конфер. «Природная среда и проблемы изучения, освоения и охраны биологических ресурсов морей СССР и Мирового океана». — Ленинград, 1984, с. 94.
11. *Иванова Н.В.* Влияние факторов внешней среды на численность и состояние промыслового запаса печорской ряпушки. // Десятая сессия Ученого совета по проблеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Декабрь 1977 г. Тез. докл. — Сыктывкар: Коми фил. АН СССР, 1977, с. 94–95.
12. *Иванова М.Б.* Распределение потока энергии в зоопланктонных сообществах чистых и загрязненных вод. // Десятая сессия Ученого совета по проблеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Декабрь 1977 г. Тез. докл. — Сыктывкар, Коми фил. АН СССР, 1977, с. 51–52.
13. *Иванова Н.В., Чуксина Н.А.* Питание ряпушки низовьев р. Печоры. // Тез. докл. Второго Всес. совещ. по биол. и биотехнике разведения сиговых рыб. Октябрь 1981. — Петрозаводск, 1981, с. 48–49.
14. *Ильенкова С.А., Попов А.Н., Туранова М.Н., Широков Л.В.* Колебания численности основных промысловых рыб восточной части Финского залива. // Изв. ГосНИОРХ, 1978, т. 129, с. 3–9.
15. *Казанова И.И.* Определитель икры и личинок рыб Балтийского моря и его заливов. // Тр. ВНИРО, 1953, т. 26, с. 221–265.
16. *Кесслер К.Ф.* Описание рыб, которые встречаются в водах Петербургской губернии. Т. 1. — СПб.: Изд. Русск. Энтомолог. Общества, 1864. — 240 с.
17. Красная книга природы Ленинградской области. Т. 3. Животные. Глав. ред. Носков Г.А. — Изд. Мир и семья, 2002. — 480 с.
18. Красная книга природы Санкт-Петербурга. Отв. ред. Носков Г.А. — СПб.: Профессионал, 2004. — 416 с.
19. Красная книга Российской Федерации. Животные. Отв. ред. Павлов Д.С. — М.: АСТ, Астрель, 2001. — 862 с.
20. *Кудерский Л.А.* Состав и многолетние изменения рыбного населения в Невской губе и восточной части Финского залива. // Финский залив в условиях антропогенного воздействия. — СПб.: Ин-т озероведения, 1999, с. 257–303.
21. *Кудерский Л.А.* Рыбные ресурсы водоемов, связанных с трассами международных транспортных коридоров. // 6-я международная конференция и выставка AQUATERRA. — СПб., 2003, с. 109–113.
22. *Кудерский Л.А.* Рыболовство и рыборазведение в Балтийском море. // Тез. докл. VI Международного экологического форума День Балтийского моря. СПб.: Издательский дом Герда, 2005, с. 242–243.
23. *Кудерский Л.А., Алексеев А.П.* Состояние уловов рыбы в Балтийском море на рубеже второго и третьего тысячелетия. // Материалы Международной специализированной конференции Акватерра-2005. — СПб.: «Рестэк», 2005, с. 324–332.
24. *Лаврентьева Г.М., Суслопарова О.Н.* Влияние интенсивного гидростроительства в восточной части Финского залива на состояние кормовой базы рыб. // Международный экологический форум «День Балтийского моря». — СПб., 2004, с. 81–82.
25. *Мельникова М.Н., Ильенкова С.А., Петренко Л.А.* Кижуч Oncorhyncus kisutch (Walb.) в реке Нарове. // Сборник науч. тр. ГосНиорх, 1981, вып. 163, с. 130–136.
26. Мероприятия по воспроизводству рыбных запасов восточной части Финского залива. ФГНУ «ГосНИОРХ», 2005. — [http://textarchive.ru/c-2225499.html].
27. *Мурза И.Г., Христофорова О.Л., Медведев М.Н.* Современная ихтиофауна Невской губы Финского залива: к проблеме экологически безопасного природопользования. // Материалы Международной специализированной конференции Акватерра-2005. — СПб.: «Рестэк», 2005, с. 332–335.

28. *Надеждин В.М.* Гидрологический режим Печорской губы и его значение в распределении промысловых рыб и объектов их питания. // Материалы сессии Ученого совета ПИНРО по результатам исследований в 1962–1963 гг. — Мурманск, 1964, с. 183–190.
29. *Неелов А.В.* Рыбы. (Природа Ленинградской области). — Л.: Лениздат, 1987. — 157 с.
30. *Нельсон Д.С.* Рыбы мировой фауны. Пер. с англ., предисл. и толковый словарь Н.Г. Богуцкой. 4-е изд., перераб. — М.: ЛИБРОКОМ, 2009. — 876 с.
31. О состоянии окружающей среды в Ленинградской области. — СПб., 2013. — 254 с.
32. *Пирожников П.Л.* Распределение и питание проходного сига Coregonus lavaretus (L.) в Финском заливе. // Вопр. ихтиол., 1971, т. 11, вып. 6(71), с. 993–1001.
33. *Попов И.Ю.* Современное состояние популяций балтийского лосося (Salmo salar L.) российской части Финского залива. // 6-я международная конференция и выставка AQUATERRA. — СПб., 2003, с. 127–129.
34. *Протопопов Н.К.* Естественное воспроизводство запасов печорского полупроходного сига-пыжьяна. // Десятая сессия Ученого совета по проблеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера». Декабрь 1977 г. Тез. докл. — Сыктывкар: Коми фил. АН СССР, 1977, с. 108–109.
35. *Ружин С.В.* Видовая структура рыбного населения Невской губы в весенне-летний период в связи со строительством защитной дамбы. // Сб. науч. тр. Гос. НИИ озерн. и речн. рыбн. х-ва, 1986, вып. 247, с. 4–13.
36. *Ружин С.В.* Видовая структура и хозяйственное использование ихтиофауны. // Тр. Зоологич. ин-та АН СССР, 1987, т. 151, с. 186–198.
37. *Сендек Д.С.* Неописанный вид сиговой рыбы (Coregonidae, Salmoniformes) гибридогенного происхождения. // Сборник материалов XIV Международного экологического форума «День Балтийского моря». — СПб.: Изд-во «Человек», 2013, с. 68–69.
38. *Сидоров Г.П., Шубина В.Н.* Ручейники в питании молоди лосося (Salmo salar L.) и хариуса (Thymallus thymallus L.) р. Щугор. // Тр. Коми научн. центра УрО АН СССР. — Сыктывкар, 1990, № 114, с. 65–76.
39. *Смирнов А.Н.* Рыбохозяйственное значение Финского залива. // Изв. Гос. НИИ озерн. и речн. рыбн. х-ва, 1977, т. 123, с. 3–8.
40. *Стасенков В.А.* О влиянии некоторых факторов на воспроизводство основных промысловых рыб Белого и юго-восточной части Баренцева моря. // Природная среда и биологические ресурсы морей и океанов. Тез. докл. Всесоюзн. конфер. «Природная среда и проблемы изучения, освоения и охраны биологических ресурсов морей СССР и Мирового океана». — Ленинград, 1984, с. 162–163.
41. *Счастная Л.С., Анцулевич А.Е., Котлов Ю.В. и др.* Материалы комплексного экологического обследования участков территории, обосновывающие придание этой территории правового статуса особо охраняемой природной территории федерального значения — государственного природного заповедника «Ингерманландский». СПбОЕ, Балтийский фонд природы 237 PDF, 2012. — ООПТ России, Ингермаландский. — [http://oopt.aari.ru/oopt/bio/27569].
42. *Успенский А.А.* Новые сведения о видовом составе рыбного населения прибрежного мелководья восточной части Финского залива (с особым вниманием к видам вселенцам). // Сборник материалов XIV Международного экологического форума «День Балтийского моря». — СПб.: Изд-во «Человек», 2013, с. 69–71.
43. *Федоров М.П., Чусов А.Н., Шилин М.Б.* Прикладная экология аквaномов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. — 254 с.
44. *Хаймина О.В., Карпова И.П.* Циклические компоненты в динамике уловов атлантического лосося и возможность их использования при прогнозировании. // Материалы XI Всероссийской конференции по проблемам рыбопромыслового прогнозирования, посвященной 150-летию со дня рождения Н.М. Книповича. — Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2012, с. 196–203.
45. *Хаймина О.В., Бойцов В.Д., Карпова И.П.* Циклические изменения климата в северо-западных морях России. // Глобальные климатические процессы и их влияние на экосистемы арктических и субарктических регионов: Тез. Докл. Междунар. науч. конф. (г. Мурманск, 9–11 ноября 2011 г.). — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2011, с. 193–194.
46. *Христофоров О.Л., Мурза И.Г.* Промысел и управление ресурсами атлантического лосося в Балтийском море. // Сборник материалов XIV Международного экологического форума «День Балтийского моря». — СПб.: Изд-во «Человек», 2013, с. 69–71.
47. *Чернова Н.В.* Липаровые рыбы Евроазиатской Арктики. — Апатиты: Изд-во Кольского научн. центра АН СССР, 1991. — 111 с.

48. *Шейко Б.А.* О названиях группы семейства рецентных рыб и рыбообразных мира. // Исследования фауны морей. Т. 74(82) — СПб.: ЗИН РАН, 2013. — 204 с.
49. *Шилин М.Б., Еремина Т.Р., Мамаева М.А.* Дреджинг наводит мосты. // Экологические аспекты дреджинга. — СПб: РГГМУ, 2013, с. 427 — 435.
50. *Шилин М.Б., Погребов В.Б., Лукьянов С.В., Мамаева М.А., Леднова Ю.А.* Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 25, с. 107–122.
51. *Широков Л.В., Ильенкова С.А., Попов А.Н.* Распределение рыб в восточной части Финского залива. // Сб. научн. трудов ГосНИОРХ, 1982, № 192, с. 57–69.
52. *Шурухин А.С.* Антропогенное воздействие на экосистему восточной части Финского залива. // 6-я международная конференция и выставка AQUATERRA. — СПб., 2003, с. 159–160.
53. *Шурухин А.С., Попов А.Н., Баранова Л.П.* Условия формирования запаса салаки (Clupea harengus membras L.) восточной части Финского залива. // 6-я международная конференция и выставка AQUATERRA. — СПб., 2003, с. 160–166.
54. *Chernova N.V.* Systematics and phylogeny of the genus Liparis (Liparidae, Scorpaeniformes). // J. Ichthyology (Supplement), 2008, vol. 48, № 10, pp. 831–852.
55. *Desse-Berset N., Williot P.* Emerging questions from the discovery of the long term presence of Acipenser oxyrinchus in France. // J. Applied Ichthyology, Special Issue: Proceedings of the 6th International Symposium on Sturgeon Wuhan, China. October 25–31, 2009. 2011, vol. 27, iss. 2, p. 263–268.
56. HELCOM Checklist of Baltic Sea Macro-species. // Baltic Sea Environment Proceedings No. 130. Helsinki Commission, Baltic Marine Environment Protection Commission. Helsinki, Finland, 2012 (2013). — 203 p.
57. HELCOM Red List of Baltic Sea species in danger of becoming extinct. // Balt. Sea Environ. Proc. No. 140, 2013. — 106 p.
58. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2013. — [http://www.iucnredlist.org].
59. *Gessner J., Ritterhoff J. (Eds.)* Species Differentiation and Population Identification in the Sturgeons Acipenser sturio L. and Acipenser oxyrinchus Mitchill. // BfN Skripten, 2004, 101. — 123 p.
60. *Kottelat M.* European freshwater fishes. A heuristic checklist of the freshwater fishes of Europe (exclusive of former USSR), with an introduction for non-systematists and comments on nomenclature and conservation. // Biologia (Bratislava), 1997, vol. 52, suppl. 5, pp. 1–271.
61. *Ludwig A., Gessner J.* What Makes the Difference? — Sea Sturgeon on Both Sides of the Atlantic Ocean. // American Fisheries Society Symposium, 2007, vol. 56, pp. 1–16.
62. *Ludwig A., Debus L., Lieckfeldt D., Wirgin I., Benecke N., Jenneckens I., Williot P., Waldman J.R., Pitra C.* When the American sea sturgeon swam east. // Nature, 2002, vol. 419. — 447 p.
63. *Reshetnikov A.N.* The current range of Amur sleeper Perccottus glenii Dybowski, 1877 (Odontobutidae, Pisces) in Eurasia. // Russian Journal of Biological Invasions, 2010, № 1(2), pp. 119–126.

С.А. Коузов

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СООБЩЕСТВ ВОДНО-БОЛОТНЫХ ПТИЦ ЛУЖСКОЙ ГУБЫ: ГНЕЗДОВАНИЕ, МИГРАЦИИ И ЛИНЬКА

S.A. Kouzov

CURRENT STATE OF WATERFOWL BIRD COMMUNITIES OF THE LUGA BAY: NESTING, MIGRATIONS AND MOULT

В работе представлены результаты работ по мониторингу миграционных стоянок и гнездовых сообществ водно-болотных птиц на южном побережье Финского залива в период с 26 марта по 20 октября 2013 г.

Ключевые слова: водоплавающие птицы, орнитокомплексы, морские нырковые утки, казарки, гагары, Haliaeetus albicilla, Haematopus ostralegus, Финский залив, Лужская губа, Кургальский полуостров, пролетные пути, миграционные стоянки, охрана природы, Красная Книга.

The paper presents the data of monitoring of migrational stopovers and breeding associations of waterfowl birds conducted on the southern bank of Gulf of Finland from March 26 to October 20 2013.

Key words: waterfowl, bird communities, sea diving ducks, geese, brants, divers, Haliaeetus albicilla, Haematopus ostralegus, Gulf of Finland, Luga Bay, Kurgalsky Peninsula, flyways, migrational stopovers, nature conservation, Red Book.

Введение

Лужская губа Финского залива играет большую роль для гнездящихся и мигрирующих водно-болотных птиц Северо-запада России [11, 3, 9,10] Вместе с тем, уровень ее изученности в этом отношении весьма неудовлетворителен, поскольку орнитологам посещались главным образом участки на ее западном берегу или на островах Кургальского рифа, примыкающих к ее горлу [2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12]. Данные по гнездовым сообществам и миграциям водно-болотных птиц на южном и восточном берегах Лужской губы фрагментарны, поскольку местные биотопы обследовались в рамках общих и кратковременных фаунистических экскурсий [1]. Так, например, в литературе почти не приводятся данные по стоянкам морских нырковых уток в открытой части акватории [10] В то же время, характер пролета этих птиц, наблюдаемый у ее горла, позволяет предполагать наличие здесь их массовых стоянок [9, 10].

Методика

Основной материал собирался в 2013 г. в рамках работ по мониторингу миграционных стоянок и гнездовых сообществ водно-болотных птиц на южном побережье Финского залива в период с 26 марта по 20 октября. Исследования разделялись на

береговые и судовые учеты. Береговые учеты проводились вдоль всей береговой линии Лужской губы, за исключением зон Усть-Лужского и Вистинского портов. В периоды миграций (апрель — май, 2-я декада июля — 1-я декада августа, сентябрь — 2-я декада октября) учеты проводились с интервалом 4–6 дней, в период гнездования (июнь — 1-я декада июля) — с интервалом 9–11 дней. Весной и осенью исследования велись при перемещении по прибрежным дорогам на автомобиле ВАЗ 21213 с выходами на обзорные точки с наилучшим обзором и краткими пешими обходами близлежащих участков берега. В летнее и осеннее время участки побережья, где отрастали тростниковые и камышовые заросли, просматривались с моторной лодки МСТА-Н с мотором Меркурий-7,5. Это тростниковые заросли между мысом Пихлисар и мысом Луото и плавни в вершине Лужской губы. В период гнездования на моторной лодке просматривалась вся линия вдоль тростников, осенью осуществлялись выходы на открытые участки, удобные для просмотра и учета птиц. Лодка перевозилась на верхнем багажнике автомобиля.

В 2013 г. через Лужскую губу проведено 8 трансектных судовых учетов мигрирующих птиц, являвшихся частью судовых учетов, проводившихся на всей акватории восточной части Финского залива. Основной маршрут пролегал от устья р. Луги к банке Мерилода, шел далее к горлу Лужской губы в 3 км от западного ее берега и заканчивался в районе банок Хитоматала и Самоед. Маршрут в обратном направлении шел от банки Вестгрунд к банке Мерилода и далее к устью р. Луга в 3–3,5 км от восточного берега Лужской губы. Движение на маршруте совершалось с курсовой скоростью 8–10 км/ч, время маршрута составляло около 2,0–2,5 ч. Маршруты из устья р. Луга в северном направлении произведены 16 и 22 мая, 21 июля, 27 сентября и 10 октября; маршруты в южном направлении из горла Лужской губы — 16 и 26 мая, 21 июля, 28 сентября и 14 октября. Учитывались все плавающие и летящие птицы с обоих бортов судна на расстояниях до предельного разрешения оптики. Для определения точного количественного и видового состава стай применялось фотографирование. Гнездование утверждалось только при находке гнезда или выводка. Случаи встреч птиц с явным репродуктивным поведением, не подтвержденные находкой гнезда или выводка, относились к вероятному гнездованию и помечались в таблицах знаком «?» (табл. 1 и 2). Для удобства изложения в таблицах учетов мигрантов данные приведены по пятидневкам или декадам, на которые выпадали дни учетов. Исследования велись с бортов рыболовного катера СМН и исследовательского судна «Соболец». В наблюдениях использовались 25-кратный полевой бинокль, 100-кратная подзорная труба Юкон и фотоаппарат Nikon D90 с телеобъективами Sigma 150-500 и Nikkor 300.

Ландшафтно-биотопические условия

Лужская губа расположена на южном побережье Финского залива между Сойкинским и Кургальским п-вами и является его заливом второго порядка. Северные участки ее западного и восточного побережий возвышены и имеют крутые склоны, образованные береговыми валами Литоринового моря. Береговые биотопы представлены либо лесом, подходящим к самому урезу воды и растущему на валунных грядах, либо локальными сырыми луговыми и тростниково-камышовыми формациями, образующимися под прикрытием многочисленных небольших валунных гряд и мысочков. Наиболее

распространены тростники под береговым склоном Кургальского п-ва от мыса Пихлисар до мыса Луото. На восточном берегу небольшие участки тростников, чередующиеся с локальными песчаными отмелями, низкотравными луговинами и каменистыми косами, имеются между мысом Колгомпя и Вистинским портом. Далее побережье между Вистинским и Усть-Лужским портами выровнено, и лес, растущий на каменистых и галечниковых грунтах, подходит здесь во многих местах почти к самой береговой линии.

По направлению к вершине губы берега становится более пологими и низменными. Здесь преобладают зарастающие лесом песчаные дюны и косы, намытые волнобоем и стоком рек Луги, Лужицы и Хаболовки. На южной части побережья Кургальского п-ва между мысом Луото и устьем р. Луги доминируют открытые и слабозарастающие песчаные пляжи и мелководья. Мелководья южного берега между устьями р. Луги и р. Хаболовки под прикрытием подводных песчаных кос зарастают мощными тростниковыми и камышовыми плантациями, переходящими в широкую полосу сырых лугов.

Самая юго-западная часть Лужской губы мелководна, что обусловлено обильными речными песчаными отложениями, но уже на широте мыса Луото происходит заметный свал глубин — до 25–30 м. В центральной и северной частях губы изобата 20 м может подходить на расстоянии до 0,5–1,0 км от берега. Через середину Лужской губы в меридиональном направлении на длину до 22 км тянется полоса каменистых банок с глубинами 0,9–4,0 м, местами выходящих на поверхность воды (банки Мерилода, Темная Лода, Репина и Вестгрунд).

Общая характеристика фауны гидрофильных птиц

Обследование 2013 г. выявило 61 вид гидрофильных птиц, из них 27 гнездящихся и вероятно гнездящихся (табл. 1). 54 вида отмечено на миграциях, из них 36 видов посещали Лужскую губу только на миграциях, а 18 — на миграциях и гнездовании. Кроме того, 15 мая в плавнях у устья р. Луга встречен один залетный вид, большая белая цапля (*Cosmerodius albus*), существенно расширяющий в последнем десятилетии свой ареал в северном направлении [18].

Таблица 1

Видовой состав гидрофильной орнитофауны и статусы видов по данным 2013 г.

Вид		Весенняя миграция	Гнездование	Летняя миграция	Осенняя миграция
Чернозобая гагара	Gavia arctica	Редк			Обычн
Краснозобая гагара	Gavia stellata	Редк			Обычн
Большая поганка	Podiceps cristatus	Многочисл	Обычн	Многочисл	Многочисл
Большой баклан	Phalacrocorax carbo	Масс		Масс	Масс
Серая цапля	Ardea cinerea	Обычн		Обычн	Обычн
Большая белая цапля	Casmerodius albus	Редк			
Белый аист	Ciconia ciconia		Малочисл		
Выпь	Botaurus stellaris		Редк		
Лебедь-кликун	Cygnus cygnus	Обычн		Редк	Обычн
Тундровый лебедь	Cygnus bewickii	Обычн			Обычн

Продолжение таблицы 1

Вид		Весенняя миграция	Гнездование	Летняя миграция	Осенняя миграция
Лебедь-шипун	Cygnus olor	Малочисл	Редк	Малочисл	Малочисл
Серый гусь	Anser anser	Малочисл		Малочисл	Малочисл
Гуменник	Anser fabalis	Обычн			Обычн
Белолобый гусь	Anser albifrons	Масс			Масс
Белощекая казарка	Branta leucopsis	Масс			Масс
Кряква	Anas platyrhynchos	Многочисл	Обычн	Многочисл	Многочисл
Свиязь	Anas penelope	Многочисл		Многочисл	Многочисл
Шилохвость	Anas acuta	Малочисл		Малочисл	Малочисл
Серая утка	Anas strepera	Обычн	Обычн	Обычн	Обычн
Широконоска	Anas clypeata	Малочисл	Обычн	Малочисл	Малочисл
Чирок-свистунок	Anas crecca	Многочисл	Малочисл	Многочисл	Многочисл
Чирок-трескунок	Anas querquedula	Редк	Редк		
Хохлатая чернеть	Aythya fuligula	Масс	Масс	Масс	Масс
Красноголовый нырок	A. ferina	Редк		Редк	Редк
Морская чернеть	A. marila	Обычн		Редк	Обычн
Гоголь	Bucephala clangula	Обычн		Обычн	Обычн
Большой крохаль	Mergus merganser	Обычн	Малочисл	Обычн	Обычн
Средний крохаль	M. serrator	Обычн	Малочисл	Обычн	Обычн
Луток	M. albellus	Малочисл			
Морянка	Glangula hyemalus	Масс		Редк	Масс
Синьга	Melanitta nigra	Масс		Обычн	Масс
Турпан	M. fusca	Многочисл		Редк	Многочисл
Орлан-белохвост	Haliaeetus albicilla		Редк		
Скопа	Pandion haliaetus		Редк?		
Серебристая чайка	Larus argentatus	Многочисл	Малочисл	Многочисл	Многочисл
Морская чайка	L. fuscus	Малочисл		Малочисл	Малочисл
Клуша	L. marinus	Малочисл		Малочисл	Малочисл
Сизая чайка	L. canus	Масс	Малочисл	Масс	Масс
Озерная чайка	L. ridibundus	Масс		Масс	Масс
Малая чайка	L. minutus	Малочисл		Редк	Малочисл
Речная крачка	Sterna hirundo	Многочисл		Многочисл	Обычн
Полярная крачка	S. paradisaea	Многочисл		Многочисл	Обычн
Малая крачка	S. albifrons	Обычн		Обычн	Малочисл
Галстучник	Charadrius hiaticula	Обычн		Обычн	Малочисл
Малый зуек	Ch. dubius	Малочисл	Обычн?	Малочисл	Редк
Кулик-сорока	Haematopus ostralegus	Малочисл	Редк		
Большой улит	Tringa nebularia	Обычн		Обычн	Малочисл
Травник	Tringa totanus	Малочисл	Обычн?	Малочисл	Малочисл
Черныш	T. ochropus	Малочисл	Малочисл?	Малочисл	Малочисл
Фифи	T. glareola	Обычн	Малочисл?	Обычн	Малочисл
Перевозчик	Actitis hypoleucos	Обычн	Обычн?	Обычн	Малочисл
Большой кроншнеп	Numenius arquata	Обычн		Обычн	Малочисл
Средний кроншнеп	N. phaeopus	Обычн		Обычн	Малочисл
Бекас	Gallinago gallinago	Малочисл		Малочисл	Малочисл

Вид		Весенняя миграция	Гнездование	Летняя миграция	Осенняя миграция
Чернозобик	Calidris alpina	Обычн		Обычн	Малочисл
Кулик-воробей	C. minutis	Малочисл		Малочисл	Малочисл
Турухтан	Philomachus pugnax	Обычн		Обычн	Малочисл
Лысуха	Fulica atra	Обычн	Обычн	Обычн	Обычн
Погоныш	Porzana porzana		Обычн		
Коростель	Crex crex		Обычн		
Водяной пастушок	Rallus aquaticus		Редк		

Примечание: «?» — означает, что гнездование предполагается на основании особенностей поведения территориальных птиц

Весенняя миграция

Весенний пролет в 2013 г. начался в последней декаде марта и продолжался до первых чисел июня. Всего за 13 учетных маршрутов отмечено 20060 особей 54 видов (табл. 2).

Таблица 2

Численность мигрантов (стоянки и транзитный пролет) в Лужской губе по результатам учетов весной 2013 г.

Вид	Март	Апрель						Май						Всего
	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
Чернозобая гагара											1	2	1	4
Краснозобая гагара												1		1
Большой баклан				31	21	432	613	60	36	92	45	23	58	1411
Большая поганка						12	24	71	94	35	21	18	23	298
Серая цапля				1	6	12	15	8	10	6	4	1	3	66
Большая белая цапля											1			1
Лебедь-кликун					9	21	14	5	3	3	2	3	2	62
Тундровый лебедь							24	12						36
Лебедь-шипун		4	3	1	4	25	21	14	2	2		6	8	90
Серый гусь				21	15	4	5	4	2		4			55
Гуменник						40	85	12		310				447
Белолобый гусь							56	120		450				626
Белощекая казарка										56				56
Кряква				11	81	141	105	33	31	37	42	31	59	571
Свиязь					14	78	156	117	74	31	21	64	84	639
Шилохвость						11	28	35	8	4			11	97
Серая утка						26	110	75	50	49	31	22	72	435
Широконоска							11	58	35	26	8	12	24	174
Чирок-свистунок					9	17	177	83				11	9	306
Чирок-трескунок							19	6			2			27
Хохлатая чернеть						420	514	289	148	213	104	87	146	1921
Красноголовый нырок						3	15	2						20
Морская чернеть									89	156				245
Гоголь				8	43	321	221	198	130	77	89	145	240	1472

Продолжение таблицы 2

Вид	Март	Апрель						Май						Всего
	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
Большой крохаль	45	11	2	21	41	110	72	33	19	11	16	32	45	413
Средний крохаль							21	86	51	23	16	26	38	261
Луток					4	21	55	31	7	2			6	126
Морянка										34	380	450	50	914
Синьга										26	450	940	2500	3916
Турпан										11	140	50		201
Серебристая чайка	123	78	87	213	45	110	79	86	129	124	67	92	85	1195
Морская чайка			8	4		3	8	9	3	1	9	3	5	53
Клуша						8	16	15	5	4	8	11	15	82
Сизая чайка				136	32	1	101	63	45	34	23	28	35	498
Озерная чайка				14	35	310	277	199	214	155	123	115	135	1577
Малая чайка									100	19		11		130
Речная крачка								56	76	79	56	45	68	380
Полярная крачка								19	42	11	24	35	46	177
Малая крачка									6	4	2	6	11	29
Галстучник										15	31	5	18	69
Малый зуек									19	14				33
Кулик-сорока										8	3			
Большой улит								22	14					36
Травник										1	9	6	11	27
Черныш						12	35	11						48
Фифи									12	78	21			111
Перевозчик								55	16	10	14			95
Большой кроншнеп						24	12	11						47
Средний кроншнеп								15	46	11				72
Бекас						17	18	9	14	8				66
Чернозобик										25	43	11		79
Кулик-воробей												14		14
Турухтан									34	23	11			68
Лысуха						108	78	76	21					283

Самые ранние мигранты (лебедь-шипун, большой крохаль и серебристая чайка), появившись задолго до начала вскрытия льда, держались на участках открытой воды на судоходном фарватере. С начала второй декады апреля при появлении первых закраин и полыней на ледовых полях у побережья началась миграция большого баклана, серой цапли, серого гуся, кряквы, гоголя, морской, сизой и озерной чаек. Основной пролет лебедей-кликунов, тундровых лебедей, гуменников, свиязей, шилохвостей, серых уток, хохлатых чернетей, лутков, клуш, чернышей, больших кроншнепов, бекасов, лысух начался в период активной ломки льда в южной части Лужской губы в конце 2-й декады апреля. В последних числах апреля начался пролет белолобого гуся, широконоски, чирка-трескунка и среднего крохаля. К началу 2-й декады мая основной пролет всех вышеперечисленных видов в основном закончился. Морская чернеть, малая чайка, полярная, речная и малая крачки, малый зуек, большой улит, фифи, средний кроншнеп и турухтан начали миграцию в течение первой декады мая. Наиболее поздно, во

2–3-й декадах мая, протекала миграция гагар, белощекой казарки, морских нырковых уток, галстучников, куликов-сорок и арктических песочников.

Самым массовым мигрантом в 2013 г. являлась синьга (табл. 2). Массовыми видами были также большой баклан, хохлатая чернеть, гоголь, серебристая и озерная чайки (1–2 тыс. особей каждого вида). К многочисленным и обычным видам следует отнести большую поганку, гуменника и белолобого гуся, крякву, свиязь, серую утку, чирка-свистунка, морскую чернеть, большого и среднего крохалей, морянку, сизую чайку, речную крачку и лысуху (0,3–1,0 тыс. особей каждого вида) (табл. 2).

Поганки, лебеди-кликуны и тундровые лебеди, речные утки, чернети, крохали, чайки, крачки, малые зуйки, кулики-сороки, кроншнепы и различные виды улитов перемещались через вершину Лужской губы, где на прибрежных мелководьях у большинства этих видов отмечались стоянки. Пересекая основания Кургальского и Сойкинского п-вов, эти виды отлетали в В-С-В направлении в сторону Невской губы. Транзитные стаи гусей появлялись как с Ю со стороны материка, так и с Ю-З по течению р. Луга. Они уходили как на С-В в сторону северного берега Финского залива, так и в сторону Невской губы. Морские нырковые утки на стоянках на банках в центральной и северной частях Лужской губы появлялись преимущественно с Ю-Ю-З, перелетая основание Кургальского п-ва со стороны континентальной Эстонии. Только отдельные группы птиц подлетали с З-С-З со стороны открытой морской акватории. После старта подавляющее большинство стай отлетало на С-З в сторону о. Мощный, и только приблизительно четверть птиц следовала в северо-восточных румбах в сторону Березовых островов и мыса Стирсуден. Также на С-З отлетали преимущественно и гагары, появляющиеся на стоянках в горле Лужской губы со стороны открытого моря.

В целом, в 2013 г. пролет лебедей, речных уток и чернетей был гораздо слабее, чем в предыдущие годы, что, видимо, связано с крайне поздними сроками схода льда и медленным прогревом поверхностного слоя воды.

Гнездовые сообщества

Из-за отсутствия островов на прибрежных мелководьях и выровненности прибрежного ландшафта в исследуемом районе полностью отсутствуют колониальные поселения чайковых. Это негативным образом сказывается на численности и видовом разнообразии местных сообществ гидрофильных птиц по сравнению с северным и западным побережьями Кургальского п-ва. В исследуемом районе в 2013 г. нами выявлено 54 гнезда и 94 выводка 17 видов; гнездование еще 10 видов предполагается на основании 102 регистраций беспокоящихся территориальных птиц (табл. 3), многие из которых отмечались повторно на тех же участках при разных учетах.

Оценочная численность гнездовых сообществ гидрофильных птиц Лужской губы в 2013 г. составила 196–259 пар. Наиболее многочисленный вид — хохлатая чернеть, обычны — большая поганка, кряква, серая утка, сизая чайка, травник, перевозчик, бекас, погоныш и лысуха. Наиболее редкими являются орлан-белохвост, выпь, белый аист, чирок-трескунок, скопа, кулик-сорока и водяной пастушок.

Наибольшая численность гнездящихся птиц отмечена в плавнях в вершине Лужской губы. Здесь зарегистрировано 16 видов и около половины всех наблюдавшихся

случаев гнездования (табл. 3), что обусловлено большой площадью данного угодья. Только на этом участке отмечено гнездование или присутствие выпи, белого аиста (охотничий участок, гнездо — в ближайшей деревне Лужицы), чирка-трескунка, скопы (охотничий участок), лысухи и водяного пастушка.

Таблица 3

Результаты учетов гнезд и выводков на различных участках побережья Лужской губы и оценка численности размножающихся пар в угодьях

Вид	1			2			3			4			5		
	Гнезд	Выводков	**Оценочно**	Гнезд	Выводков	**Оценочно**	Гнезд	Выводков	**Оценочно**	Гнезд	Выводков	**Оценочно**	Гнезд	Выводков	**Оценочно**
Большая поганка	2	3	**3**				6	8	**12**					1	**1**
Белый аист							1	1	**1**						
Выпь							1?	1?	**1**						
Лебедь-шипун	1	2	**1**		1	**0**		1	**1**						
Кряква		2	**4-6**		2	**2-3**	2	5	**10-15**		1	**1**		3	**4-5**
Серая утка	2	3	**5-7**				3	7	**15-20**						
Широконоска	1	2	**2-3**				2	3	**6-9**						
Чирок-свистунок		1	**1-2**		1	**1-2**									
Чирок-трескунок							1?		**1-2**						
Хохлатая чернеть	4	4	**5-7**				5	12	**25-30**				1	2	**2**
Большой крохаль		2	**2-3**												
Средний крохаль	1	2	**2-3**											1	**1-2**
Орлан-белохвост		1												1	**2**
Скопа								1?							**1**
Серебристая чайка	3	3	**3**										2	2	**2**
Сизая чайка	6	4	**6**										4	5	**4-8**
Кулик-сорока														1	**1**
Малый зуек				3	3?	**3**							4?	5?	**5-7**
Травник	4?	3?	**4**				6?	8?	**6**				2?	3?	**2**
Черныш	2?		**2**	1?		**1**							1?		**1**
Фифи	1?		**1**				4?	2?	**4-6**						
Перевозчик	2?	3?	**3-4**	4?	5?	**4**				2?	1?	**2-3**	5?	3?	**5-6**
Бекас	2?		**1-2**				5?		**5-8**						
Лысуха							5	7	**18-25**						
Погоныш	3?	3?	**3**				6?	7?	**9-12**						
Коростель	1?		**1**				3?	2?	**5-8**						
Водяной пастушок							1?		**1-2**						

Примечание: 1 — участок от мыса Пихлисар до мыса Луото; 2 — участок от мыса Луото до устья р. Луги; 3 — участок от устья р. Луги до западной границы Усть-Лужского порта; 4 — участок между Усть-Лужским и Вистинским портами; 5 — участок от Вистинского порта до мыса Колгомпя.

На участке западного побережья от мыса Пихлисар до мыса Луото видовое разнообразие было еще выше (19 видов), но общее число гнездящихся птиц приблизительно в 2 раза меньше (табл. 3). Это объясняется, с одной стороны, большим разнообразием

прибрежного микрорельефа и биотопов, с другой — меньшей шириной полосы береговых биотопов. В отличие от предыдущего участка, здесь появляются чирок-свистунок, для гнездования которого требуется близость лесных стаций, большой и средний крохали, серебристая и сизая чайки, заселяющие каменистые мозаичные побережья, а также орлан-белохвост (охотничий участок). У последнего вида в начале августа на камнях у мыса Пихлисар регулярно наблюдался выводок из 2-х молодых и 2-х взрослых птиц.

Наиболее бедно птицами заселены песчаные пляжи от мыса Луото до устья р. Луги и выровненный каменистый берег заросший лесом между Усть-Лужским и Вистинским портами. В последнем районе отмечаются только единичные выводки кряквы и перевозчика, а на между р. Луга и мысом Луото — выводки кряквы и чирка-свистунка, отдельные пары перевозчика, черныша, и малого зуйка. При этом черныши держатся не на самом берегу, а в сыром прибрежном лесу.

Участок на берегу Сойкинского п-ва между Вистинским портом и мысом Колгомпя по разнообразию микрорельефа и биотопов сходен с участком между мысами Пихлисар и Луото на западном берегу Лужской губы. Однако здесь тростниковые и камышовые заросли развиты еще меньше. Здесь отмечено 12 гнездящихся и вероятно гнездящихся видов, оценочная их численность составляет 27–36 пар. Отсутствует ряд фоновых уток (серая утка, широконоска, чирок-свистунок и большой крохаль), а также пастушковые и некоторые кулики (фифи и бекас). В то же время только на этом участке обнаружен выводок такого редкого вида, как кулик-сорока, и так же, как и у мыса Пихлисар отмечено регулярное присутствие выводка орлана-белохвоста с двумя молодыми птицами.

Летние миграции и линька

В летний период за 8 учетных дней на миграциях отмечено 18062 особей 44 видов. Доминирующее положение за весь период по числу встреч занимала свиязь. Массовыми в данном районе были также кряква, хохлатая чернеть, синьга, серебристая, сизая и озерная чайки и речная крачка (табл. 4). Многочисленными видами были большой баклан, большая поганка, серая утка, чирок-свистунок, гоголь и полярная крачка. По сравнению с Кургальским п-вом, кулики представлены гораздо меньшим числом мигрирующих особей, что обусловлено значительно меньшими площадями открытых песчаных кос и островков [8, 10]. Точно так же, в Лужской губе по сравнению с западными и южными секторами Кургальского п-ва отмечена значительно меньшая численность гоголя.

В течение июня отмечались только послебрачные перемещения больших поганок, речных уток, хохлатых чернетей, крохалей и гоголей. В начале месяца доминировали восточные румбы пролета, в конце июня и начале июля — западные. К началу июля в плавнях в вершине Лужской губы образовалось линочное скопление из приблизительно 600 птиц. Среди них доминировали кряква, свиязь и хохлатая чернеть, были также обычны большая поганка, серая утка, широконоска и чирок-свистунок. Небольшие группы из линяющих больших поганок и хохлатых чернетей общей численностью до 100 птиц, в конце июля — начале августа регулярно отмечались у северного берега Сойкинского полуострова между мысом Колгомпя и Вистинским портом.

Таблица 4

Результаты учетов мигрантов (стоянки и транзитный пролет) в летний период

	Июнь			Июль			Август		Всего
	1	2	3	1	2	3	1	2	
Большой баклан	120	76	45	78	64	54	97	178	712
Большая поганка	56	34	25	34	78	105	124	96	552
Серая цапля	4	8	5	11	8	27	31	28	122
Лебедь-кликун	3	3	3						9
Лебедь-шипун	6	2	8						16
Серый гусь	4	5					12	8	29
Кряква	130	94	240	323	210	178	287	154	1616
Свиязь	104	350	293	214	320	256	365	145	2047
Шилохвость	8			12		5			25
Серая утка	178	113	45	65	75	45	124	153	798
Широконоска	45	32	12	38	14	6	26	46	219
Чирок-свистунок	45	132	68	95	54	34	95	278	801
Хохлатая чернеть	95	195	230	65	160	215	174	73	1207
Красноголовый нырок		9						7	16
Морская чернеть					6				6
Гоголь	354	210	134	45				124	867
Большой крохаль	34	21	12	6					73
Средний крохаль	43	56	24	12					135
Морянка				3					3
Синьга	310		56		120	560			1046
Турпан	4								4
Серебристая чайка	104	78	124	112	156	210	270	174	1228
Морская чайка	4	5	8	3	1	12	16	11	60
Клуша	12	8	7	16	12	18	14	27	114
Сизая чайка	28	37	31	127	210	272	240	135	1080
Озерная чайка	110	87	123	94	360	410	174	255	1613
Малая чайка					4	5			9
Речная крачка	45	78	56	232	178	450	310	123	1472
Полярная крачка	67	34	42	39	75	123	178	46	604
Малая крачка	4	11	3	21	6	34	45	11	135
Галстучник	4	1	3	6	23	18	58	46	159
Малый зуек	2		5	6	4	9	8	14	48
Большой улит		1			8	5	11	5	30
Травник						6	15	21	42
Черныш					5		8	4	17
Фифи		12	7	14	78	173	85	12	381
Перевозчик	5		8	12	23	31	32	41	152
Большой кроншнеп			12	32	11		17	21	93
Средний кроншнеп			24	43		25	28	13	133
Бекас			3		14	11	8	12	48
Чернозобик	5		2		11	59	45	74	196
Кулик-воробей							5	11	16
Турухтан		4	7	2	11	32	25	43	124
Лысуха	5						12	18	35

Во второй половине июля отмечена послебрачная миграция селезней синьги (табл. 4), идущая в западном направлении со стороны открытой части Копорского залива, через горло Лужской губы в Нарвский залив. Часть стай останавливалась на банках северной части Лужской губы и после старта уходила на Ю-Ю-З к вершине Лужской губы и далее в сторону континентальной Эстонии. Послебрачные и послегнездовые перемещения куликов и чайковых птиц отмечены с 3-й декады июля, когда появились первые стаи больших и средних кроншнепов. Но наиболее массовый пролет начался с середины июля, когда начались миграции чаек, фифи, перевозчиков, турухтанов и чернозобиков. В августе начался основной пролет крачек, больших улитов, чернышей, зуйков и куликов-воробьев. Послелиночные и послегнездовые миграции речных уток стали заметны в первой декаде августа. До конца 2-й декады птицы перемещались в основном в восточных румбах и также подлетали со стороны материка с южных направлений, в конце месяца стали преобладать направления пролета в сторону зимовок.

Осенние миграции

В период осенних миграций с 3-й декады августа до конца 2-й декады октября за 12 учетных дней зарегистрировано 35149 птиц 49 видов. Доминирующим видом была морянка, к массовым видам также относились белолобый гусь, свиязь, хохлатая чернеть, сизая и озерная чайки (2–4 тыс. особей каждого вида) (табл. 5). Многочисленны — большой баклан, кряква, синьга, турпан и серебристая чайка (1–2 тыс. особей каждого вида).

Таблица 5

Численность мигрантов (стоянки и транзитный пролет) в Лужской губе по результатам учетов осенью 2013 г.

	Август		Сентябрь						Октябрь				Всего
	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	
Чернозобая гагара								4	6	24	12	6	52
Краснозобая гагара									2	1	2	3	8
Большой баклан	196	310	164	180	250	210	167	144	54	38	23	34	1770
Большая поганка	86	62	73	56	23	17	45	56	11				429
Серая цапля	11	17	8	21	11	5	1	4	1	3			82
Лебедь-кликун	2						4	12	21		5	11	55
Тундровый лебедь								21	8	4	21		54
Лебедь-шипун	4	11	14	4	2	21	14	7	6		2	7	92
Серый гусь		6		4									10
Гуменник							50	350	110	43			553
Белолобый гусь								1200	2300	340			3840
Белощекая казарка								120	210	134	310	170	944
Кряква	125	145	340	150	90	110	310	120	187	110	65	130	1882
Свиязь	230	170	250	345	145	210	450	525	56	123	156	11	2671
Шилохвость							45	12					57
Серая утка	110	75	89	71	134	12		45					536
Широконоска	23	45	56	34		11							169

Продолжение таблицы 5

	Август		Сентябрь						Октябрь				Всего
	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	
Чирок-свистунок	224	256	125	46		24							675
Хохлатая чернеть	45	56	134	76	44	310	479	750	110	23	11		2038
Красноголовый нырок	5	14		2									21
Морская чернеть							120	170	45				335
Гоголь	12	34		34	210	120	89	210	78	23	34	11	855
Большой крохаль	5	8	12		6	21	45	11		6			114
Средний крохаль				5			14	23					42
Морянка									830	230	4500	110	5670
Синьга										210	1630		1840
Турпан							34	79	270	140	620	11	1154
Серебристая чайка	240	270	165	189	210	75	45	74	23	45	21	34	1391
Морская чайка	8	2	11	5	12	6	9		3		1		57
Клуша	17	12	21	5	1	4	6	5		4		2	77
Сизая чайка	110	240	280	320	56	154	550	310	270	214	267	180	2951
Озерная чайка	210	250	340	460	540	320	265	110	23		11		2529
Речная крачка	120	210	78	165	67	45	78	23					786
Полярная крачка	45	134	145	110		76	11						521
Малая крачка	12	4	14										30
Галстучник	34	11	5		4								54
Малый зуек	4												4
Большой улит	16	11		7		4							38
Травник	5	4	1										6
Черныш		8		1									9
Фифи	5												5
Перевозчик	21	5	7										33
Большой кроншнеп	5												5
Средний кроншнеп	11												11
Бекас	21	34	17	5	2		6	9	3		1		98
Чернозобик	34	5	15	8					5				67
Кулик-воробей		32	11										43
Турухтан	25	12		6				2					45
Лысуха	46	78	113	42	12	122	23		5				441

Кулики, у большинства видов которых основной пролет происходил в конце июля и 1–2 декадах августа, в осенний период были представлены единичным количеством особей. Они отмечались преимущественно до середины сентября, позднее могли быть встречены только отдельные турухтаны, чернозобики, а также бекасы, пролет которых шел до середины октября.

В конце августа и в 1–2 декадах сентября шел основной пролет серого гуся, серой утки, широконоски, чирка-свистунка, красноголового нырка, малой крачки. Одновременно в 1-й декаде сентября наблюдался первый пик пролета большого баклана, большой поганки, кряквы, свиязи, хохлатой чернети, серебристой и сизой чаек, речной и полярной крачек и лысухи. У озерной чайки наиболее массовая миграция шла во 2-й декаде сентября.

В течение 3-й декады сентября — 1 декады октября проходил пролет гуменника, белолобого гуся и морской чернети. У большого баклана, большой поганки, кряквы, свиязи, хохлатой чернети, серебристой и сизой чаек, речной и полярной крачек и лысухи в 3-й декаде сентября отмечался последний пик миграции. Одновременно с этим на банках в центре Лужской началось накопление первых стай турпанов.

В октябре большинство летевших ранее видов закончило миграцию. До конца периода наблюдений отмечались только небольшие группы больших бакланов, крякв, свиязей, хохлатых чернетей, серебристых, сизых и озерных чаек. В это время происходил основной пролет гагар, лебедей-кликунов, тундровых лебедей, белощеких казарок и морских нырковых уток.

Пролет большинства птиц шел по тем же руслам что и весной, но в обратных направлениях в З-Ю-З румбах. Так, пролет лебедей, речных уток, чернетей, чаек, кроншнепов и различных видов улитов шел, в основном, через вершину Лужской губы и основания Сойкинского и Кургальского полуостровов. Основные их стоянки наблюдались на мелководьях в южной части побережья Кургальского п-ва.

Гуси появлялись в вершине Лужской губы в веере направлений от В-С-В со стороны Невской губы, а также со стороны архипелага Сескар с С-С-В, и транзитом отлетали на З-Ю-З, придерживаясь долины р. Луга. Сходным маршрутом со стороны Сескара через Лужскую губу летели и стаи белощекой казарки, часть из которых делала краткие остановки у банки Мерилода.

Морские нырковые утки появлялись в Лужской губе со стороны открытого моря как с С-В румбов из Копорского залива, так и с С-С-В и даже С румбов со стороны архипелага Сескар и о-вов Мощный и Малый. Большая часть стай оседала на стоянках в Лужской губе, которые располагались в ее центральной и северной частях — как на мелководных банках, так и на участках с глубинами 15–20 м. Все стоянки были на удалении от берега не менее 2,0–2,5 км. После старта подавляющее большинство стай следовало к устью р. Луга, где, переходя на высотный полет, птицы отлетали на Ю-Ю-З в сторону континентальной Эстонии. Меньшая часть стай после старта в Лужской губе уходила над водой на С-З и, огибая с севера Кургальский п-ов, присоединялась к потоку птиц, летящих транзитом мимо горла Лужской губы на З-Ю-З.

Гагары обычно не появлялись южнее самого горла Лужской губы, где часть птиц останавливалась на открытой акватории на краткий отдых. Подлет шел с тех же румбов, что и у морских нырковых уток. Отлетали птицы на З-Ю-З в сторону открытого моря.

Заключение

Как видно из приведенного материала, подавляющее большинство птиц в Лужской губе представляют мигранты — 59,01 % видового состава ($n = 61$) и 99,81 % всех встреченных птиц ($n = 73445$). Такое соотношение является следствием прохождения здесь Беломорско-Балтийского пролетного пути [11, 13, 14] и расположением здесь биотопов с богатыми кормовыми условиями, пригодных для длительных стоянок большого количества видов гидрофильных птиц.

Из-за отсутствия сети прибрежных островов гнездовые гидрофильные орнитокомплексы Лужской губы представляют собой как бы обедненный вариант орнито-

комплексов Кургальского п-ова [7, 8]. Этим обусловливается отсутствие в Лужской губе массовых колоний морских птиц: больших бакланов, серебристых чаек, полярных и речных крачек. По этой же причине из состава местных орнитокомплексов выпадает и целый ряд редких для региона видов, гнездящихся в таких колониях на островах вдоль северного и западного побережий Кургальского п-ова (большой баклан, серый гусь, белощекая казарка, пеганка, морская чернеть, турпан, морская чайка, клуша, чеграва, полярная и речная крачки, малый чернозобик, камнешарка). В то же время здесь становятся обычными на гнездовании лысуха и большая поганка, крайне редко отмечаемые на северном и западном берегах Кургальского полуострова. Это связано с сильным распресняющим действием стока р. Луга на плавни в вершине Лужской губы и, соответственно, с вероятным улучшением кормовых условий для этих видов.

Среди мигрантов отмечены как виды, мигрирующие преимущественно вдоль южного побережья Финского залива и через Невскую губу (поганки, лебеди, гуси, речные утки, чернети, крохали, гоголя, кроншнепы, перевозчики, различные улиты, лысухи), так и мигранты, следующие через север Финского залива и Выборгский залив (гагары, казарки, морские нырковые утки, песочники). Это обусловлено пересечением на Кургальском п-ове нескольких локальных миграционных путей со специфическими наборами видов [9, 10].

Особенно интересны в этом отношении данные по пролету морских нырковых уток и казарок. Ранее считалось, что их основной пролет идет исключительно через север и центр Финского залива по линии «горло Финского залива — Выборгский залив» [13, 11, 5]. При проведении в 1997 г. кратких наблюдений за пролетом морских уток на Кургальском Рифе их авторам удалось наблюдать значительный пролет морских нырков только осенью, и только над открытым морем в западном направлении [3, 4]. Вместе с тем, еще в 60–70-х гг. прошлого века данные радарных обследований на западном побережье Эстонии показывали, что после массового старта в Рижском заливе заметная часть стай морских нырковых уток отлетает на большой высоте на С-В через континентальную Эстонию в сторону восточной части Финского залива [15, 17, 16]. В осеннее время над внутренними районами Эстонии прослеживался пролет в обратном направлении. Однако до последнего времени выход этих стай на южное побережье Финского залива и отлет их отсюда через континентальные районы никем не прослеживался. Это мы связываем в первую очередь с отсутствием регулярных наблюдений в Лужской губе, куда, судя по данным радаров, и летит часть стай. Ранее мы могли только предполагать об этом на основании наблюдений на Кургальском п-ове в 1993–1999 и 2005–2008 гг. Впервые подробно проследить подлет стай морских нырков в Лужскую губу со стороны материка весной и отлет их из Лужской губы над материком удалось только в 2013 г.

30 видов местной гидрофильной фауны являются редкими и занесены в Красные Книги различного достоинства (табл. 6). Из них 18 встречаются здесь только на миграциях или кочевках, 5 видов — только на гнездовании (или вероятном гнездовании) и 7 видов — и на гнездовании и на миграциях. Особенно следует обратить внимание на присутствие в гнездовой фауне таких уязвимых и редких в регионе видов, как орлан-белохвост, выпь, скопа, кулик-сорока и водяной пастушок. Важное природоохранное значение имеют расположенные здесь миграционные стоянки таких редких видов, как краснозобая и чернозобая гагары, лебедь-кликун, тундровый лебедь, шилохвость и луток.

Таблица 6

Природоохранные статусы редких видов. отмеченных в Лужской губе в 2013 г.

Вид	Охранный статус вида				
	МСОП	ККРФ	ККБ	ККФ	ККЛО
Gavia arctica	-	+	+	+	+
Gavia stellata	-	+	+	+	+
Casmerodius albus	+	+	-	-	-
Botaurus stellaris	-	+	+	+	+
Cygnus bewickii	-	-	-	-	+
Cygnus olor	+	-	-	+	-
Cygnus cygnus	+	-	+	-	+
Anser anser	-	-	+	+	+
Branta leucopsis	+	+	-	+	+
Anas penelope	-	-	+	-	-
Anas acuta	-	-	+	-	+
Anas clypeata	-	-	+	-	-
Anas strepera	-	-	-	+	+
Bucephala clangula	-	-	+	-	-
Mergus serrator	-	-	+	-	-
Mergus merganser	-	-	+	-	-
Mergus albellus	-	-	+	+	+
Haliaeetus albicilla	+	+	+	+	+
Pandion haliaetus	+	+	+	+	+
Charadris hiaticula	-	-	+	+	+
Haemotopus ostralegus	-	+	+	-	+
Tringa nebularia	-	-	+	-	-
Tringa totanus	-	-	+	-	-
Numenius arquata	-	+	+	-	+
Numenius phaeopus	-	-	+	-	+
Larus fuscus	-	-	+	-	+
Sterna paradisaea	-	-	+	-	+
Sterna albifrons	-	+	+	-	+
Crex crex	+	-	+	-	+
Rallus aquaticus	-	-	+	-	+

Литература

1. *Бубличенко Ю.Н.* К орнитофауне южного побережья Финского залива. // Русский орнитологический журнал, 2000, вып. 107, с. 6–20.
2. *Бубличенко Ю.Н., Бубличенко А.Г.* Фауна наземных позвоночных животных Кургальского полуострова и островов Кургальской Реймы. // Труды С.-Петербургского о-ва естествоиспытателей, 1998, сер. 1, т. 92, с. 85–106.
3. *Бубличенко Ю.Н., Козлов И.Л.* Наблюдения за миграциями водоплавающих и околоводных птиц на Кургальском полуострове в апреле-мае 1997. // Материалы по программе «Изучение состояния популяций

мигрирующих птиц и тенденций их изменений в России (Второй выпуск), Москва, 18020.02.1998. — М., 1998, с. 70–76.
4. *Бузун В.А.* Миграции птиц на архипелаге Кургальский риф (юго-восточная часть Финского залива) осенью 1997 г.// Материалы по программе «Изучение состояния популяций мигрирующих птиц и тенденций их изменений в России (Второй выпуск), Москва, 1998, С. 108–122.
5. Бузун В.А., Данные о миграции птиц на острове Сескар (Финский залив, Балтийское море) весной 1997 г.// Материалы по программе «Изучение состояния популяций мигрирующих птиц и тенденций их изменений в России (Второй выпуск). — М, 1998, с. 47–70.
6. *Бузун В.А., Мераускас П.* Орнитологические находки в восточной части Финского залива. // Русский орнитологический журнал, 1993, т. 2, вып. 2, с. 253–255.
7. *Коузов С.А.* Большой баклан на Кургальском полуострове. // Русский орнитологический журнал, 2007, т. 16, № 349, с. 339–365.
8. *Коузов С.А.* Особенности биологии лебедя-шипуна и серого гуся на Кургальском полуострове. // Бюллетень рабочей группы по гусеобразным Северной Евразии «Казарка», 2009, т. 12, вып. 2, с. 85–114.
9. *Коузов С.А.* Летне-осенние скопления и транзитные миграции водно-болотных птиц на Кургальском полуострове в 2007 г. // Изучение динамики популяций мигрирующих птиц и тенденций их изменений на Северо-Западе России, 2009, вып. 6, с. 71–85.
10. *Коузов С.А.* Весенняя миграция водно-болотных птиц на Кургальском полуострове в 2008г. // Изучение динамики популяций мигрирующих птиц и тенденций их изменений на Северо-западе России, 2010, вып. 7, с. 42–59.
11. *Мальчевский А.С., Пукинский Ю.Б.* Птицы Ленинградской области и сопредельных территорий. — Изд. Ленинградского университета, т. 1, 1983. — 480 с.
12. *Мандрыка О.Н., Шилин М.Б., Коузов С.А., Лукьянов С.В.* Современное состояние, разнообразие и уязвимость биологических сообществ Кургальского рифа. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 31, с. 104–119.
13. *Носков Г.А., Гагинская А.Р., Хааре А.О., Каменев В.М., Большаков К.В.* Миграции птиц в восточной части Финского залива. // Сообщения Прибалтийской комиссии по изучению миграций птиц, 1965, № 3, с. 3–27.
14. *Шилин М.Б., Лебедева О.В., Коузов С.А., Башкина Г.И.* Состояние орнитофауны на трассе «Северного Потока»: проявляется ли воздействие морского газопровода? // Гидротехника, 2013, № 1(30), с. 4–8.
15. *Якоби В.Э.* Радиолокационные и визуальные наблюдения перелета птиц осенью 1964 г. в Прибалтике. // Материалы VI Прибалтийской орнитологической конференции. — Вильнюс, 1966.
16. *Якоби В.Э.* Радиолокационные и визуальные наблюдения за весенним перелетом морских уток на западном побережье Эстонии. // Сообщения Прибалтийской комиссии по изучению миграций птиц, 1983, № 16, с. 24–36.
17. *Якоби В.Э., Йыги А.И.* О миграции синьги на линьку по данным визуальных и радарных наблюдений. // Сообщения Прибалтийской комиссии по изучению миграций птиц, 1972, № 7, с. 118–138.
18. *Lipsbergs J., Opermanis O.* Nesekmīga lielo balto gārņu Egretta alba ligzdošana Engures ezerā 2002. Putni dabā 14, 2, 2004, pp. 8–10.

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

О.А. Ковалева, Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев, В.А. Жамойда, Е.Н. Нестерова

АБРАЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЮЖНОЙ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА: ПРИЧИНЫ, ДИНАМИКА, ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ

O. Kovaleva, D. Ryabchuk, A. Sergeev, V. Zhamoida, E. Nesterova

EROSION OF SOUTHERN COASTAL ZONE OF THE GULF OF FINLAND: REASONS, DYNAMICS AND PREDICTION OF ITS EVOLUTION

В ходе исследования проведен детальный анализ процессов переработки берегов (абразии): установлена скорость абразии, ее причины и предпосылки, рассчитана емкость вдольберегового потока наносов, а также его реальный объем, выделены особо уязвимые участки береговой зоны и даны рекомендации по проведению берегозащитных мероприятий.

Ключевые слова: абразия, южная береговая зона Финского залива, вдольбереговой перенос наносов.

Detailed analysis of coastal erosion was carried out for this research work including a determination of a rate of erosion, its reasons and preconditions, a calculation of a long-shore sediment transport capacity and its real volume. Also particularly sensitive regions of the southern coastal zone were distinguished and recommendations relating coastal protection were developed.

Key words: erosion, southern coastal zone of the Gulf of Finland, long-shore sediment transport.

Введение

Лито- и морфодинамические процессы береговой зоны восточной части Финского залива долгое время не привлекали к себе достаточного внимания исследователей. Преобладало представление о рассматриваемой береговой зоне как об области слабой активности береговых процессов [7]. В статье, посвященной обзору состояния берегов РФ [6], отмечалось, что «берега Ленинградской области практически никак не освещены в литературе».

Первые систематические исследования береговых зон региона, включавшие изучение литодинамики (в том числе стационарные наблюдения), были организованы в конце 1980-х гг. группой сотрудников Ленинградского Государственного университета под руководством Л.К. Баркова [3, 13]. В 1987–1990 гг. специалисты Академии наук Эстонии провели маршрутные обследования берегов восточной части Финского залива,

результатом которых было их монографическое описание и первая классификация, опубликованные К. Орвику в книге «Геология Финского залива» [15].

Изучение динамики берегов, с одной стороны, было вызвано необходимостью теоретического осмысления закономерностей лито- и морфодинамических процессов, с другой стороны, диктовалось практическими задачами берегозащиты. Во время экстремальных штормов 1975, 1982, 1983, 1985 и 1986 гг. песчаные пляжи Нарвского залива были размыты на значительном протяжении, абразия затронула подножие авандюн. С 1975 по 1990 г. ширина пляжей западнее пос. Лебяжье уменьшилась на 25–30 м, а у пос. Большая Ижора на 60–70 м. При этом были частично размыты сформировавшиеся здесь ранее песчаные аккумулятивные косы — в первом случае (пос. Лебяжье) на протяжении 230 м, во втором (пос. Большая Ижора) — 300 м. В Лоцманском селении (пос. Лебяжье) в результате абразии был разрушен жилой дом (рис. 1) [15]. Таким образом, к началу 1990-х гг. была установлена высокая интенсивность береговых процессов рассматриваемого района. В Лоцманском селении для защиты жилых построек сооружен вдольбереговой мол из валунного материала, на северном берегу залива (в районе пос. Комарово) ЛенМорНИИПроектом был реализован экспериментальный проект берегозащиты с помощью создания искусственного пляжа. В середине 1990-х гг. как научные и мониторинговые проекты, так и работы по технико-экономическому обоснованию берегоукрепления были прерваны.

В «период безвременья», на рубеже XX–XXI вв. в результате сильных штормов в Лоцманском селении в первой (прибрежной) лини лоцманских домов был разрушен памятник истории и культуры — дом, много лет арендовавшийся семьей писателя В.В. Бианки [9].

Рис. 1. Частный дом, разрушенный в 1989 г. в результате абразии берега (пос. Лоцманское селение) (фото проф. К. Орвику и фрагмент космического снимка Google Earth)

Новый этап береговых исследований в восточной части Финского залива связан с работами ВСЕГЕИ при участии НИИКАМ и РГГМУ, начавшимися в 2004 г. и ведущимися до настоящего времени в режиме мониторинга. В ходе исследований

было установлено, что на наиболее ценных в рекреационном отношении побережьях (Курортный район Санкт-Петербурга, Невская губа, южный берег Финского залива в районе пос. Большая Ижора — Лебяжье), преобладают процессы абразии и отступания береговой линии со скоростями от 0,3–0,5 до 2 м/год [18].

Одним из интереснейших объектов геолого-геоморфологических исследований является южный берег залива — уникальная природная система, сочетающая в себе процессы разрушения берегов, аккумуляции пляжевого материала в виде песчаных кос и их последующей трансформации. В 2012–2013 гг. в рамках проекта «Исследование влияния процессов переработки российских участков берега Балтийского моря, испытывающих существенное антропогенное воздействие, на качество морских вод и разработка рекомендаций по предотвращению загрязнения и засорения вод Балтики», выполнявшегося ВСЕГЕИ по заказу Невско-Ладожского Бассейнового водного управления (БВУ), были осуществлены комплексные детальные исследования южной береговой зоны залива на участке от форта Красная Горка до Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС). Целью проекта было исследование динамики прибрежной зоны, прогноз развития переработки (абразии) берега и разработка научно обоснованных мероприятий по смягчению негативного воздействия морских вод на берега.

Постановка задачи была связана с экстремальными размывами берегов на ряде участков рассматриваемого района в результате осенне-зимних штормов 2011–2012 гг. При штормовых нагонах были зафиксированы максимальные по сравнению с наблюдениями предыдущих лет зоны затопления прибрежных территорий в районе пос. Лебяжье и Большая Ижора. В районе песчаных кос наблюдался перехлест штормовых волн через вершину авандюны и были зафиксированы крайне высокие скорости размыва берега. На 57 км автодороги (в районе пос. Лебяжье), произошел подмыв основания проезжей части с частичным разрушением дорожного полотна, в результате чего движение было временно приостановлено; по краю проезжей части образовался абразионный уступ [5, 9].

Методы и материалы

В период с 2004 по 2012 г. в береговой зоне рассматриваемого района были выполнены комплексные геолого-геофизические исследования, включавшие различные виды обследования подводного берегового склона: гидролокация бокового обзора (ГЛБО) и прецизионное эхолотирование (164 км) по сети профилей, перпендикулярных береговой линии, непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) (60 км), поверхностный донный пробоотбор (85 станций) на подводном береговом склоне, а также ежегодные вдольбереговые маршруты с отбором проб пляжевых осадков (более 300 образцов) и нивелированием на опорных профилях (от 5 до 10 профилей в различные годы наблюдений). Результатом работ стало получение детального представления о характере поверхностного покрова донных отложений и особенностях рельефа берегов и подводного берегового склона. Измерения, выполнявшиеся в режиме мониторинга, позволили выявить динамику микрорельефа дна и распределение зон подводного размыва, транзита и аккумуляции осадочного материала, трансформации

берегового рельефа и конфигурации береговой линии. Для определения динамики береговой зоны производился ретроспективный анализ данных дистанционных наблюдений (в том числе, аэрофотосъемки 1990 г. из архива НИИКАМ).

В 2013 г. полигон исследований был расширен в западном направлении — 52 км ГЛБО (СМ2 производства английской фирмы C-MAX Ltd) и эхолотирования (с использованием эхолота фирмы HUMMINBIRD (США) — модель 450TX TRI BEAM и эхолот FURUNO), 30 км НСП (с применением сейсмоакустического приборно-аппаратурного комплекса GEONT–HRP (производство ООО «Спектр-Геофизика», Россия)). Для заверки результатов геофизического профилирования на 30 станциях отобраны пробы поверхностных осадков; впервые на 7 станциях выполнена подводная видеосъемка с использованием подводной телевизионной установки «Супер-ГНОМ», усовершенствованной камерой высокого разрешения GoPro HD HERO. На берегу в 2013 г. были организованы обзорные вдольбереговые маршруты общей протяженностью 25 км. Проводилось детальное описание и картирование пляжа, измерение морфологических параметров пляжа, установление состава береговых осадков и определение состояния песчаных дюн. С целью актуализации имеющейся информации выполнено описание состояния берегов и берегозащитных сооружений, отбор проб осадков пляжей (30 проб) и приурезовой части подводного берегового склона (15 проб), нивелировки по опорным профилям (рис. 2). В пределах аварийного участка берега (57-й км шоссе Санкт-Петербург — Ручьи) было проведено георадиолокационное профилирование (георадар марки SIR System-2000 производства фирмы GSSI (США)) для выявления строения верхней части геологического разреза и интерпретационное бурение (с применением бензобура STIHL BT 121).

Работы по навигационно-гидрографическому и геодезическому обеспечению заключались в проведении плановой привязки всех видов наблюдений с помощью систем спутниковой привязки «Garmin» и «Furuno».

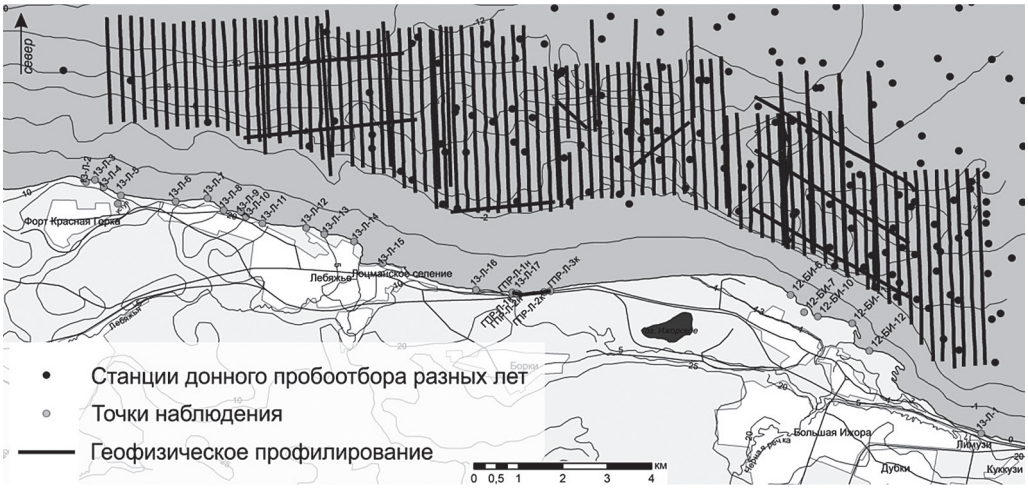

Рис. 2. Карта фактического материала

Результаты

Геологическое строение и геоморфология береговой зоны. Южная береговая зона восточной части Финского залива в районе поселка Лебяжье и Большая Ижора сложена четвертичными отложениями поздне-неоплейстоценового — голоценового возраста [2, 4]. Важной особенностью исследуемого района является достаточно глубокое залегание кровли ледниковых отложений (за исключением западного участка в районе форта Красная Горка), в результате чего здесь практически отсутствуют выходы морены на поверхность дна и берега. Наличие в зоне волнового воздействия выходов морены приводит к формированию валунных бенчей, бронирующих берег от дальнейшего размыва и, в то же время, являющихся причиной дефицита осадочного материала. Берега и подводный склон в рассматриваемом районе преимущественно сложены песчаными отложениями, в отличие от других районов залива. Таким образом, особенности геологического строения верхней части разреза не предполагают наличия дефицита песчаного материала как одного из определяющих факторов развития береговой зоны.

Рассматриваемый участок береговой зоны находится в области относительных опусканий со скоростями от 0 до −2 мм/год [21]. Относительное повышение уровня моря подтверждается также анализом современных тенденций лито- и морфодинамических процессов (в частности, постепенным надвиганием песчаных кос на лагуны с размывом прикорневых и наращиванием дистальных участков) [14].

Рельеф побережья характеризуется сложной террасированной поверхностью. Слабонаклонная в сторону залива поверхность морской равнины располагается на абсолютных отметках 10–12 м , и отделена от расположенной гипсометрически выше озерно-ледниковой равнины четким абразионным уступом (высотой от 3 до 7 м, с крутизной склонов от 10 до 15°) или береговыми валами [4], находящимся на расстоянии от 1,5 км (пос. Большая Ижора) до нескольких десятков метров (форт Красная Горка) от современной береговой линии. Морская равнина сложена песчаными отложениями, преимущественно мелкозернистыми, кварцево-полевошпатовыми песками мощностью 0,5–8 м с линзами разнозернистого песка. На поверхности морской равнины развиты реликтовые береговые валы, дюны, косы и пляжи. Важно отметить, что как абразионные уступы максимальной фазы литориновой трансгрессии (7600–6700 кал.л.н.), так и береговые аккумулятивные формы этого возраста, имеют направление, аналогичное современным.

Нижний ярус рельефа побережья представлен современными абразионными террасами, пляжами и песчаными косами. Генезис и механизмы современного развития песчаных кос рассмотрены авторами в ряде публикаций [10, 17, 24]. Формирование кос началось в период от 4000 до 3000 кал.л.н. Основным литодинамическим механизмом их развития как в позднем голоцене, так и в настоящее время является перемещение в направлении потока наносов волнообразных контуров береговой линии («вдольбереговых песчаных волн»), формирующих чередующиеся зоны размыва, транзита и аккумуляции.

Берега исследуемой территории относятся к выравнивающимся бухтовым (абразионный валунный (моренный) в районе форта Красная Горка, абразионный песчаный в центральной части изучаемой площади) и вторично-расчлененным (абразионно-аккумулятивный песчаный в пос.Лебяжье и Большая Ижора) [2]. Береговые формы рельефа

сложены отложениями, различными по степени устойчивости к абразии, морена — в западной части береговой зоны, пески и глины на остальном ее протяжении, относятся к IV и V классам соответственно [12].

В рельефе подводного берегового склона, достаточно отмелого, исследованиями ВСЕГЕИ выявлена серия аккумулятивных песчаных террас (рис. 3), сформировавшихся на протяжении позднего голоцена [1, 17]. По данным ГЛБО, мористее уступа нижней подводной террасы находится зона интенсивного подводного размыва, с выделяющимися в рельефе эрозионными ложбинами стока, имеющими СЗ-ЮВ простирание (рис. 4). Крупные знаки ряби на поверхности дна ложбин служат индикатором непрерывного движения материала. Параметры микрорельефа эрозионных ложбин свидетельствует о периодическом воздействии на него довольно интенсивных (до 40–50 см/с) придонных течений.

Характеристика современных лито- и морфодинамических процессов. По результатам наблюдений и ретроспективного анализа материалов дистанционного зондирования установлено, что рассматриваемая береговая зона характеризуется чередованием стабильных зон и участков высоких скоростей отступания берегового уступа, причем интенсивность абразионных процессов резко возросла в последние годы. К аварийным участкам береговой зоны, на которых требуются безотлагательные меры по берегозащите, относятся:

1) участок ***активизации абразионных и обвально-осыпных процессов в районе пос. Красная Горка***, угрожающих сохранности частной застройки (как исторически сложившейся, так и вновь возведенной) и автодороги. Неустойчивости склонов способствует наличие в разрезе уступов глинистых слоев и зон разгрузки подземных вод. Установлено, что резкая активизация процессов наблюдается в последние два года. В 2011 г. осыпные склоны были стабилизированы растительностью, летом 2013 г. все склоны активны, произошел отрыв крупных масс грунта, падение древесной растительности и резкое отступание бровки уступа. Для минимизации негативных последствий опасных экзогенных геологических процессов необходимо осуществление эффективных мероприятий по берегозащите и укреплению склонов для всего аварийного участка длиной 700 м.
2) участок ***периодической (сезонной) активизации абразионных процессов в Лоцманском Селении (пос. Лебяжье)***; под угрозой историческая частная жилая застройка. За период с 1990 по 2010 г. береговой уступ сместился на 8 м в сторону берега, была уничтожена древесная растительность, площадь береговой террасы сократилась на 260 м^2. По состоянию на лето 2012 г. здесь располагался один из аварийных участков. К лету 2013 г. в тыловой части пляжей была сооружена бетонная волноотбойная стенка, опоясывающая основание зданий. Примененный вид берегоукрепления, очевидно, является в данном случае необходимым, однако, возможно, недостаточным. При эксплуатации порта МЧС, расположенного к западу от рассматриваемого аварийного участка, крайне важным является схема использования песка, изъятого при дноуглублении фарватера, расположенного к западу от устья реки Лебяжьей, впадающей в залив. В случае изъятия песка из вдольберегового потока наносов значительно усилится угроза размыва на соседних (восточных) сегментах берега. Для оценки направленности и скорости происходящих

процессов необходим дальнейший мониторинг, как данного участка, так и вновь построенного порта МЧС, где уже начались процессы вымывания песка из-под бетонного основания.

3) участок ***активизации абразионных процессов, угрожающих полотну автодороги (57-й км шоссе Санкт-Петербург — Ручьи)***. Берег в районе 57-го км автодороги Санкт-Петербург — Ручьи отступил на 30 м за 20 лет (средняя скорость отступания около 1,5 м/год). Сократившаяся площадь береговой террасы на отрезке 700 м составила 13,7 тыс. м^2. Исследования с применением георадиолокации показали, что основной причиной деструктивных экзогенных геологических процессов в данном случае являются особенности строения разреза отложений. На глубине от 4–4,5 м (на участках максимальной высоты берегового уступа к востоку и западу от зоны размыва шоссе) до 2,5–3 м под слоем песков прослеживаются выходы серых пластичных глин. Глины являются водоупором, по кровле слоя происходит разгрузка подземных вод, что резко снижает прочностные свойства залегающих выше песчаных образований и способствует активизации абразии.

4) ***песчаные косы в районе пос. Большая Ижора***. Данный участок характеризуется сложной динамикой контура береговой линии (в западной части — вдольбереговые песчаные волны, перемещающиеся в восточном направлении со скоростью 10–15 м/год, с чередованием зон активного размыва, транзита и аккумуляции; в центральной части — формирование крупного аккумулятивного песчаного тела; в восточной части (к востоку от устья р. Черная) — рост песчаной косы с размывом прикорневой и ростом дистальной части). В настоящее время активные экзогенные геологические процессы не выходят на уровень опасных вследствие отсутствия здесь жилой и промышленной застройки, а также транспортных коммуникаций, однако в случае реализации существующих планов по застройке зоны песчаных кос, ситуация может коренным образом измениться.

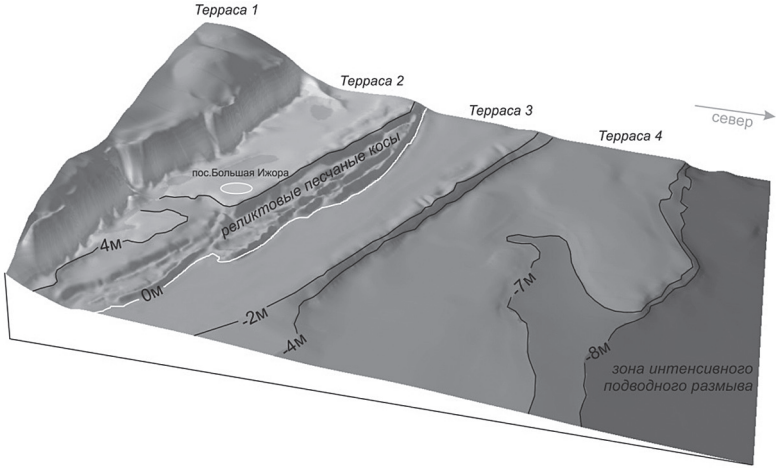

Рис. 3. Морфология подводного берегового склона в районе пос. Большая Ижора

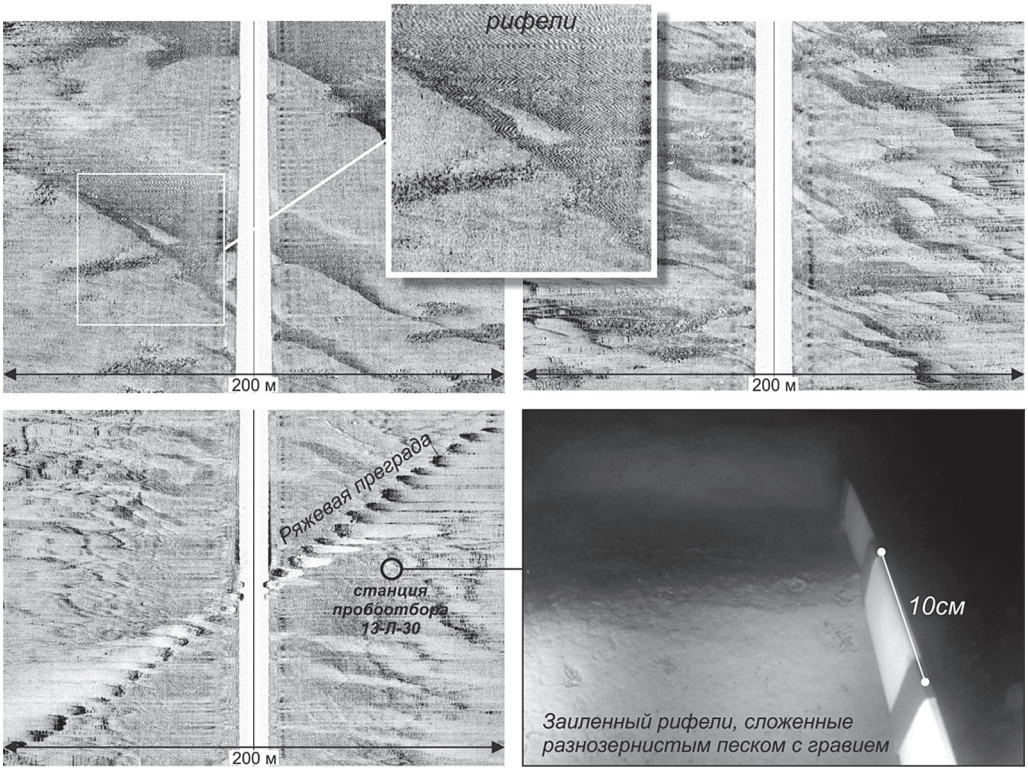

Рис. 4. Эрозионные ложбины стока у подножия подводной террасы в районе пос. Большая Ижора, 2012 г. и ложбины, пересекающие ряжевую преграду. На правом нижнем рисунке — подводная фотография рифелей на дне эрозионной ложбины

Результаты расчетов мощности и емкости вдольберегового потока наносов

Направленность литодинамических процессов береговой зоны во многом определяется качественными и количественными параметрами вдольберегового потока наносов, движение которого в восточном направлении определяется как по морфологическим признакам (ориентировка аккумулятивных форм, отклонение устьев рек), так и по результатам анализа изменения гранулометрических характеристик пляжевых осадков. Анализ статистических коэффициентов гранулометрических распределений образцов, отобранных в приурезовой зоне пляжей вдоль береговой линии, по методике П. Мак Ларена [23] выявил наличие вдольберегового потока наносов восточного направления с высоким уровнем значимости ($p = 0{,}01$).

Количественная оценка потока наносов представляет собой значительно более сложную задачу. В условиях конкретного участка берега расход наносов не может превышать определенного предела, называемого ***емкостью вдольберегового потока наносов***. Расчет емкости потока наносов заключается в определении количества

осадочного материала, который может быть вовлечен во вдольбереговой транспорт при данных гидрометеорологических условиях. Для расчета емкости потока наносов для субширотного участка берега (от форта Красная Горка до поворота береговой линии к юго-востоку в районе пос. Большая Ижора) использовалась формула, предложенная Научным центром береговой инженерии, США (Coastal Engineering Research Center, USA) в 1984 г. [22]. Основная идея данного метода заключается в том, что количество материала, который может быть транспортирован в ходе вдольберегового переноса, пропорционален отношению энергии вдольбереговых волн к единице длины берега [26]. К сожалению, вследствие отсутствия в открытом доступе рядов гидрометеорологических данных непосредственно для рассматриваемого района, для определения статистики возникновения ветров различных румбов были использованы данные, полученные сотрудниками Таллиннского Технологического Университета для станции Каллбадагрунд (Финляндия); измерения на данной станции проводились в период 1981–2012 гг.

В восточной части Финского залива доминируют южные, западные и юго-западные ветры. Расчеты показали, что наибольший перенос материала происходит при волновых воздействиях, вызванных ветрами северо-западного направления, при этом волны, подходящие к берегу под другими углами так же вызывают перемещение песка, но уже в меньшем количестве (рис. 5). Проведенные расчеты подтвердили восточное направление вдольберегового потока наносов. Результаты показали, что при наличии доступного материала с каждого метра береговой зоны (по профилю от глубины начала воздействия волн на поверхность дня до линии максимального ежегодно-повторяющегося заплеска прибойного потока) может быть транспортировано до 76000 м^3 песка ежегодно.

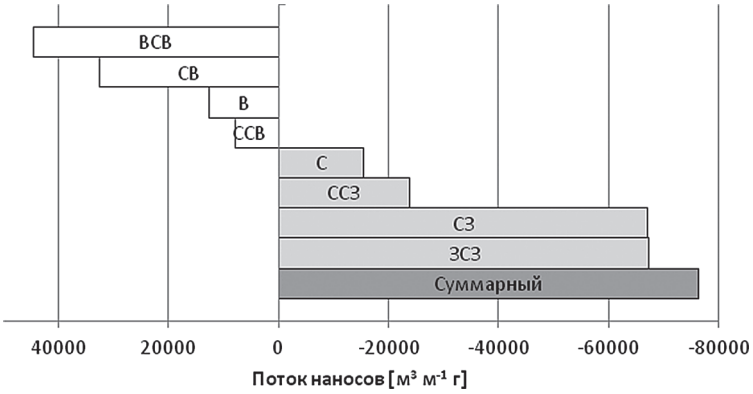

Рис. 5. Распределение вдольберегового потока наносов, вызванного ветрами различных направлений (отрицательные значения соответствуют направлению потока наносов с запада на восток, положительные — с севера на юг)

Изменение лито-, гидро- и морфологических условий вдоль береговой линии обусловливает изменение емкости потока в сторону уменьшения (в этом случае избыток наносов выпадет из потока, вызвав аккумуляцию их на надводной и подводной частях

берегового склона и возможное выдвижение линии уреза в сторону моря) или увеличения (тогда дефицит наносов будет возмещен за счет размыва пляжа и берегового уступа, и береговая линия сместится в сторону суши). В пределах рассматриваемого участка уменьшение емкости потока наносов наблюдается в районе формирования песчаных кос в пос. Большая Ижора и связано с поворотом береговой линии к юго-востоку.

Второй важнейшей характеристикой вдольберегового потока наносов является его реальный расход, называемый ***мощностью потока наносов***. При недостаточном количестве осадочного материала на подводном береговом склоне мощность потока наносов составляет некоторую часть от емкости. Л.К. Барков с соавторами предложили определять направление перемещения и его мощность по объему материала, слагающего аккумулятивные формы рельефа дна и по интенсивности заносимости оградительных сооружений (13). Был исследован ряд ключевых точек на южном берегу, включая пос. Шепелево, Большая Ижора, Лебяжье. Расчеты показали, что величина наносодвижущей силы, а, следовательно, и мощность потока наносов уменьшается с запада на восток. По данным наблюдений наибольший размыв был зафиксирован на глубине 2–3,5 м, в то время как в приурезовой зоне преобладает транзитный перенос материала вдоль берега. Мощность потока наносов восточного направления для южного берега была оценена в 20000 м^3 в год для района пос. Лебяжье и 10000 м^3 в год для района пос. Большая Ижора.

Математическое моделирование с использованием формулы расхода наносов, разработанной И.О. Леонтьевым [10, 20], позволяет получить более точные результаты. Вычисления включают последовательные расчеты трансформации волн, скоростей вдольбереговых течений, обусловленных волнами и ветром, а также расходов наносов в каждой точке профиля в береговой зоне. Для исследуемой территории был выбран профиль между пос. Лебяжье и Большая Ижора. Для данного профиля результирующая мощность потока наносов составляет 4300 м^3 в год [10].

Сравнение имеющихся результатов расчета мощности потока наносов (от 4 до 20 тыс. м^3 в год) и его емкости (до 76 тыс. м^3 в год) на субширотном участке береговой зоны (от форта Красная Горка до поворота береговой линии в районе пос. Большая Ижора) указывает на дефицит наносов в береговой зоне, что создает предпосылки для активного развития абразионных процессов.

Обсуждение полученных результатов

Основные геолого-геоморфологические условия и гидрометеорологические факторы, определяющие развитие абразионных процессов в береговой зоне восточной части Финского залива и их интенсивность, рассмотрены в работах [18, 19]. Развитию деструктивных процессов благоприятствуют прочностные свойства четвертичных отложений, слагающих береговую зону, и рельеф подводного берегового склона. На значительном протяжении прибрежные мелководья восточной части Финского залива представляют собой валунно-галечные бенчи, формирующиеся в результате размыва морены и являющиеся однозначным индикатором дефицита свободных наносов. Вдоль северного берега залива выявлена подводная терраса, поверхность которой расположена на глубинах 3–5 м. Мористый край террасы размывается и отступает в

сторону берега. Вдоль подножия террасы (на глубинах 8–12 м) выявлены подводные эрозионные ложбины, по которым происходит отток воды и перемещение осадочного материала от берега к морю [19].

Как показали проведенные исследования дефицита наносов на рассматриваемом участке береговой зоны (за исключением западной части, в районе форта Красная Горка) не наблюдается. Район пос. Лебяжье — Большая Ижора является единственным участком современной береговой зоны, где на глубинах 1–2 м продолжает формироваться аккумулятивная песчаная терраса. Терраса, в свою очередь, является источником донного питания для песчаных кос. Вторым источником осадочного материала для формирования кос являются абразионные уступы высотой от 1–2 до 5–7 м, расположенные выше по направлению потока наносов. Указанные факторы теоретически должны исключать высокие скорости размыва берегов, однако наблюдения и анализ МДЗ свидетельствуют об обратном. В отличие от северного берега залива (Курортный район Санкт-Петербурга) участки активных абразионных процессов в рассматриваемом районе распространены значительно более локально, однако интенсивность их проявления здесь чрезвычайно высока.

Как показали исследования 2013 г., зоны наиболее интенсивной абразии пространственно связаны с выходами в пределах береговой зоны глин, представляющих собой наиболее легко размываемый тип отложений из спектра четвертичных образований восточной части Финского залива. Большую роль в данном случае играют также водоупорные свойства глин и разгрузка по их кровле подземных вод. Совокупность данных факторов обуславливает наличие отдельных участков берега, характеризующихся аномально высокими скоростями отступания береговых уступов.

Гидрометеорологические процессы контролируют экстремальные размывы берегов, наблюдающиеся при сочетании трех условий: подъем уровня воды, шторма западных — юго-западных и северо-западных румбов и отсутствие ледяного покрова вдоль берегов. На протяжении последнего десятилетия активизация абразионных процессов наблюдалась в осенне-зимние периоды 2006–2007, 2011–2012 гг. [19] и 2013 г. Интенсификации абразионных процессов на рассматриваемом участке береговой зоны на протяжении последнего десятилетия могут способствовать: 1) наблюдающаяся тенденция к потеплению в зимний период и более позднее, чем ранее даты установления ледяного покрова; 2) увеличение частоты подъемов уровня (наводнений) в осенне-зимний период [16]; 3) наблюдающееся в северной Балтике изменение направлений циклонов (усиление западных и ослабление северо-восточных ветров) [25]. Следует отметить, что интенсификации абразии могут способствовать и антропогенные процессы.

До 1990-х гг. на морском месторождении песчаного материала «Лондонская отмель» велась подводная разработка. В последующие годы месторождение было законсервировано, но с недавнего времени добыча песка возобновилась. При проведении полевых работ в 2011–2013 гг. были выявлены следы работы землесосов на поверхности подводной песчаной террасы. Изъятие больших объемов песчаного материала из потока наносов может нарушить баланс седиментационной системы. Как уже говорилось, предыдущий пик интенсивности абразионных процессов наблюдался в конце 1980-х гг., однако оценить вклад антропогенного фактора сложно.

Важным фактором, воздействующим на лито- и морфодинамику береговой зоны стал ввод в строй Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. При закрытых створах КЗС угроза размыва берегов с его внутренней стороны (в Невской губе) понижается, однако с внешней стороны, в том числе в пределах рассматриваемого участка южного берега, интенсивность абразии резко возрастает. Прогнозируемое эвстатическое повышение уровня моря в будущем [8], которое для рассматриваемого района может составить более 1 м за 100 лет, также вызовет активизацию размыва берегов.

Наконец, негативную роль играет отсутствие научно обоснованной системы берегозащиты. Проводимые в настоящее время берегозащитные мероприятия носят локальный характер и не способны решить проблему устойчивости береговой системы в целом. О локальном берегоукреплении в пос.Лоцманское Селение уже упоминалось. В 2012 г. реализованы комплексные работы по укреплению склона и берегозащите в пос. Красная Горка, где недавно построенные коттеджи располагаются в опасной близости от отступающей бровки уступа. Судя по внешнему виду склона, работы осуществлены с применением современных эффективных методов и включают водоотведение подземных вод, отсыпку склона, закрепление его основания габионами и стабилизацию растительностью (рис. 6).

Рис. 6. Восточная часть аварийного участка береговой зоны в районе пос. Красная Горка

Выполненные работы создают уникальный прецедент попытки решения задачи берегоукрепления на одном из наиболее сложных участков береговой зоны российской части Финского залива. В то же время, закрепление одного из участков склона еще более ухудшает ситуацию на соседних. При таком подходе следует ожидать активизацию разрушения соседних участков склонов и постепенного образования техногенного «мыса» на укрепленном участке, после чего начнется и его разрушение не только со стороны моря, но и с краев. В данном случае необходимо осуществление эффективных мероприятий по берегозащите и укреплению склонов для всего аварийного участка длиной 700 м. В целом же, учитывая существующие сценарии климатических изменений, предполагающие дальнейшее уменьшение длительности ледового периода и повышение, как среднего уровня моря, так и увеличение частоты экстремальных

подъемов воды, задача минимизации негативных последствий опасных экзогенных процессов может быть реализована только в рамках разработки единой стратегии берегозащиты на региональном или федеральном уровне.

Заключение

В целом, по результатам работ ВСЕГЕИ в южной береговой зоне Финского залива можно сделать следующие выводы:

Особенности геологического строения определяют субширотную ориентировку береговой линии и ее относительную выровненность, и, как следствие, незащищенность от волнового воздействия штормов западных и северо-западных направлений. Геологическое строение верхней части разреза субаэральной части береговой зоны, сложенной неустойчивыми к размыву песками и глинами, способствует активному проявлению абразионных (размывных) процессов. Характер современных тектонических движений (опускание со скоростями до 2 мм/год) создает благоприятный фон для проявления абразии.

Геологическое строение и рельеф подводного берегового склона (наличие вдоль-береговой песчаной террасы шириной от 1 до 1,5 км, поверхность террасы расположена на глубинах около 4 м), а также преобладание на подводном береговом склоне песчаных осадков, не позволяло выявить наличие дефицита наносов в качестве одного из факторов, определяющих развитие береговых процессов. В то же время, сравнение имеющихся результатов данных о мощности потока наносов и выполненных расчетов его емкости на субширотном участке береговой зоны (от форта Красная Горка до поворота береговой линии в районе пос.Большая Ижора) выявило наличие недостатка осадочного материла, что и создает предпосылки развития абразионных процессов.

На поверхности дна батиметрически ниже прибрежной подводной террасы (глубины 2,5–10 м) преобладают зоны подводного размыва и транзита (зоны динамичных песков) осадков; характер микрорельефа дна зон динамичных песков свидетельствует о периодическом воздействии на него достаточно интенсивных (до 40–50 см/с) придонных течений. На ряде участков мощность покровных песков не превышает 10–20 см.

Изъятие песка с подводного берегового склона в ходе разработки месторождения «Лондонская отмель» повышает риск возникновения опасных размывов берегов. По данным пробоотбора в отработанных карьерах происходит накопление алевропелитовых илов.

Экстремальные размывы берегов наблюдаются при следующем сочетании гидрометеорологических факторов: подъем уровня воды, шторм западных — юго-западных румбов и отсутствие ледового покрова вдоль берегов. За период с 2004 по 2012 г. такие условия наблюдались трижды — в осенне-зимние периоды 2006–2007 гг., 2011–2012 гг. и 2013 г., что привело к резкой активизации экзогенной геодинамики в береговых зонах, опасным размывам берегов и существенному повреждению инфраструктуры прибрежных территорий.

Примеры осенне-зимних сезонов 2006–2007 гг., 2011–2012 гг. и 2013 г., когда наиболее позднее установление ледового покрова соответствовало наибольшим размывам песчаных пляжей, выявили общую тенденцию в нарушении ритма действия

режимообразующих факторов: ледяной покров, обеспечивающий естественную защиту берега от волнового воздействия, не успевал установиться, в то время как шторма происходили в обычный для них срок. Результаты исследований по Балтийскому морю в целом, показывают уменьшение периода развития льда на акватории на протяжении последнего столетия. Таким образом, в будущем следует ожидать существенного увеличения интенсивности размыва берегов исследуемого района именно в период, предшествующий установлению ледового покрова.

Ввод в строй Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга (КЗС) коренным образом повлиял на развитие литодинамических процессов в их экстремальных проявлениях. При закрытых створах КЗС угроза размыва берегов с внутренней стороны сооружений (в Невской Губе) понижается, однако с внешней, морской стороны, в том числе в пределах рассматриваемого ключевого участка (пос. Лебяжье — пос. Большая Ижора), интенсивность абразии резко возрастает. Результаты моделирования, подтвердившиеся во время наводнений осени — зимы 2011 г. прогнозируют дополнительный (по сравнению с условиями, существовавшими до строительства КЗС) подъем уровня воды в районе пос.Большая Ижора на 40–50 см, что приведет к существенному увеличению площадей затапливаемых территорий.

На выделенных аварийных участках необходима срочная реализация комплексных берегозащитных мероприятий.

Литература

1. *Амантов А.В., Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Сапелко Т.В.* Геологическое строение подводных террас восточной части Финского залива и моделирование условий их формирования на послеледниковом этапе развития региона. // Региональная геология и металлогения, 2012, № 50, с.15–27.
2. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря. Гл. ред. О.В. Петров. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. — 78 с.
3. *Барков Л.К.* О литодинамике прибрежной зоны и дна восточной части Финского залива. // Вестник ЛГУ, 1989, № 28, с. 25–32.
4. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Ильменская. Лист О-35-VI. Объяснительная записка. Составили: В.А. Селиванова, И.С. Недригайлова. Редактор Т.Н. Алиханова. — М.: «Недра», 1964.
5. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2011 г. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. — 80 с.
6. *Калинина Л.И., Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д.* Картирование абразионных берегов России. // Вестник МГУ. Сер.5. География, 1992, №3, с.46–59.
7. *Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г.* Берега. Сер. Природа Мира. — М.: изд-во «Мысль», 1991. — 479 с.
8. *Каплин П.А., Павлидис Ю.А., Селиванов А.О.* Развитие береговой зоны морей России в условиях повышения их уровня и потепления климата. // Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI веке, 2001, с. 16–27.
9. *Карлин Л.Н., Денисов В.В., Шилин М.Б.* Основные концепции современного берегопользования. // СПб.: РГГМУ, 2010. — 293 с.
10. *Леонтьев И.О.* Динамика профиля песчаного берега на различных масштабах времени. // Сборник научных трудов «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», 2010, № 4(10), с.78–89.
11. *Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Сухачева Л.Л.* О генезисе некоторых форм рельефа дна и берегов восточной части Финского залива. // Океанология. Июль-Август, 2011, т. 51, № 4, с. 734–745.
12. *Леонтьев О.К., Никифоров Л.Г., Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. — М.: изд-во МГУ, 1975. — 336 с.

13. *Логвиненко Н.В., Барков Л.К., Усенков С.М.* Литология и литодинамика современных осадков восточной части Финского залива. — Л.: изд-во ЛГУ, 1988. — 148 с.
14. *Малинин В.Н., Митина Ю.В., Шевчук О.И.* К оценке затопления побережья Курортного района Санкт-Петербурга при прохождении экстремальных наводненческих циклонов. // Ученые Записки РГГМУ, 2013, № 29, с. 136–142.
15. *Орвику К., Гране О.* Современные берега. В кн.: Геология Финского залива. Под ред. А. Раукаса и Х. Хюваринена. — Таллинн: изд-во АН Эстонии, 1992. — 422 с.
16. *Павловский А.А.* Изменение гидрологических характеристик Финского залива в XXI столетии и градостроительное планирование Санкт-Петербурга. // Наш общий Финский залив. Сборник материалов I научной конференции СПбГУ, посвященной «Году Финского залива — 2014», 2012, с. 180–184.
17. *Сергеев А.Ю., Рябчук Д.В., Жамойда В.А., Неевин И.А., Дронь О.В.* Голоценовая история образования литоморфодинамической аномалии в южной береговой зоне Финского залива (район пос. Большая Ижора). // Региональная геология и металлогения, 2014, т. 56 (в печати).
18. *Спиридонов М.А., Рябчук Д.В., Орвику К.К., Сухачева Л.Л., Нестерова Е.Н., Жамойда В.А.* Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов. // Региональная геология и металлогения, 2010, № 41, с. 107–118.
19. *Рябчук Д.В., Колесов А.М., Сергеев А.Ю., Спиридонов М.А., Жамойда В.А., Чубаренко Б.И.* Абразионные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами режимообразующих факторов. // Геоморфология, 2012, № 4, с. 99–105.
20. *Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В., Шлычков В.А., Савкин В.М., Кусковский В.С.* Управление состоянием берегов водохранилищ. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 239 с.
21. *Ядута В.А.* Новейшая тектоника Санкт-Петербурга и Ленинградской области. // Минерал, 2006, № 1. — [http://www.mineral-journal.ru/Article/yaduta.htm].
22. *Kovaleva O.* Coastal erosion and coastal protection in the Baltic Sea: master thesis. — Saint Petersburg: State University, 2013. — 52 p.
23. *McLaren P., Bowles D.* The effect of sediment transport on grain-size distribution. // Journal of sedimentary petrology, 1985, 55-4, p. 0457–0470.
24. *Ryabchuk D., Leont'yev I., Sergeev A., Nesterova E., Sukhacheva L., Zhamoida V.* The morphology of sand spits and the genesis of long-shore sand waves on the coast of the eastern Gulf of Finland. // Baltica, 2011, 24(1), p. 13–24.
25. *Tõnisson H., Orviku K., Jaagus J., Suursaar U., Kont A., Rivis R.* Coastal damages on Saaremaa Island, Estonia, caused by the extreme storm and flooding on January 9, 2005. // Journal of Coastal Research, 2008, 24(3), p. 602–614.
26. *Van Rijn L.C.* Long-shore sand transport. // 28th ICCE, Cardiff, UK, 2002, p. 2439–2451.

Д.В. Рябчук, Е.Н. Нестерова, В.А. Жамойда, А. Котилайнен, Г. Валлиус, Л.Л. Сухачева, М.А. Спиридонов

ДИНАМИКА СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕВСКОЙ ГУБЕ (ФИНСКИЙ ЗАЛИВ) ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

D.V. Ryabchuk, E.N. Nesterova, V.A. Zhamoida, A. Kotilainen, H. Vallius, L.L. Sukhacheva, M.A. Spiridonov

DYNAMICS OF SEDIMENTATION PROCESSES IN THE NEVA BAY (THE GULF OF FINLAND) UNDER INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC FACTORS

Результаты полевых работ и лабораторных исследований, анализ материалов дистанционного зондирования, архивных и литературных данных показывает, что характер седиментационных процессов в Невской губе значительно изменился на протяжении последних 300 лет. В результате комплекса природных и техногенных факторов в Невской губе создались условия для формирования алевро-пелитовых илов. В настоящее время рельеф и поверхностный осадочный покров дна Губы практически полностью изменен техногенными процессами.

Ключевые слова: седиментационные процессы, Финский залив, Невская губа, техногенные факторы.

Results of marine geological investigations of the eastern Gulf of Finland as well as analysis of remote sensing data, archive and literature data permit to conclude that during last three centuries the sedimentation processes in the Neva Bay have changed the special conditions of mud accumulation in the western part of the Neva Bay have developed. Significant part of the bottom relief and surface sediments is completely transformed by technogenic processes.

Key words: sedimentation processes, the Gulf of Finland, the Neva Bay, anthropogenic factors.

Невская губа — наиболее мелководная, восточная часть Финского залива. Длина Губы — 21 км, максимальная ширина — 15 км, площадь водного зеркала — 329 км^2. Максимальные естественные глубины в пределах акватории не превышают 5–6 м [12]. После завершения строительства Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) Невская губа фактически превратилась в специфическую «техногенную лагуну» — внутреннюю морскую акваторию мегаполиса.

Техногенное воздействие на дно Невской губы и ее берега началось с основания Санкт-Петербурга. На искусственных островах в акватории было возведено 17 фортов. Первый форт «Кроншлот» был построен в 1704 г. по проекту и под руководством самого Петра I. Между островом Котлин и берегами Губы в XVIII–XIX вв. были сооружены ряжевые преграды, представляющие собой линии затопленных деревянных срубов, заполненных камнем. В 1885 г. закончилось строительство Морского канала, глубины

в котором достигали 12 м. В XX в. проводились масштабные работы по углублению фарватеров, подводной добыче песка, в 1979 г. началось строительство Комплекса защитных сооружений Ленинграда от наводнений (КЗС). По дну были также проложены многочисленные кабели, частично заглубленные в подводные траншеи. В конце 1980-х — начале 1990-х гг. в юго-восточной части Губы производились гидротехнические работы по намыву новых городских территорий.

Новый этап мощного техногенного воздействия начался в 2006 г. в связи с выполнением проекта «Морской фасад», в ходе которого осуществляются масштабные работы созданию новых территорий на площади 476,7 га с использованием технологии гидронамыва, строительству пассажирского портового терминала и углублению фарватеров. Одновременно продолжаются работы по отвалу грунтов в районе подводных свалок «Северная Лахта» и «Южная Лахта» [8, 30]. Гидротехнические работы ведутся также в районе порта Бронка и КЗС [29].

Исследования изменений геологической среды Невской губы в результате комплекса техногенных процессов являются важной составной частью оценки воздействия техногенеза на природную среду восточной части Финского залива в целом и необходимы для выработки эффективных и научно-обоснованных мер по рациональному природопользованию.

Материалы и методы исследования

Данные о строении верхней части геологического разреза и распределении поверхностных донных осадочных образований в пределах дна Невской губы были получены ВСЕГЕИ в ходе геолого-съемочных и эколого-геологических работ в восточной части Финского залива. В 1987–1989 гг. была проведена генетическая типизация осадков Невской губы, дана характеристика современных условий осадконакопления и составлены ее литологическая, лито-фациальная и геохимическая карты масштаба 1:100 000 [1]. В 1991–1993 гг. были организованы эколого-геологические исследования в юго-восточной части Невской губы. В 1994 г. завершилась производственная геологическая съемка шельфа в масштабе 1:200 000 (ГСШ-200) восточной части Финского залива с Невской губой, в ходе которой удалось уточнить литологический состав донных осадков Невской губы, установить основные закономерности распределения фациальных типов поверхностных донных отложений и выявить тенденции их развития. В 1993–1995 гг. в Невской губе было начат геоэкологический (эколого-геологический) мониторинг [24], выделены и закартированы основные техногенные фациальные обстановки [5].

В 2004 г. ВСЕГЕИ были выполнены геолого-геофизические исследования с применением гидролокатора бокового обзора (ГЛБО) (аппаратура «СМ2» фирмы С-МАХ, Англия) в западной части Невской губы по 107 профилям. Протяженность профилей ГЛБО составила 550 км. Работы сопровождались эхолотным промером глубин. С целью заверки и интерпретации данных ГЛБО выполнено 52 станции пробоотбора донных осадков. Полученные полосовые изображения ГЛБО (сонограммы) обработаны с применением компьютерной программы «OCTOPUS», позволяющей получать площадную акустическую картину дна. На основе интерпретации сонограмм и мозаики

ГЛБО, заверенных донным пробоотбором, составлена фактографическая карта донных осадков и техногенных объектов западной части Невской губы масштаба 1:25 000 [26].

В 2004–2005 гг. были также осуществлены российско-финские исследования современных илов Невской губы. В ходе экспедиции ВСЕГЕИ с участием специалистов Геологической Службы Финляндии (GTK) с помощью герметичной грунтовой трубки были отобраны 10 колонок донных осадков. Колонки были опробованы с интервалом 1 см и проанализированы в лаборатории Геологической Службы Финляндии на содержание тяжелых металлов (ICP-AES и ICP-MS) и 137Cs (гамма-спектрометрия).

В 2007–2010 гг. ВСЕГЕИ были выполнены комплексные исследования геологической среды прибрежных мелководий Невской губы (по заказу Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга и ФГУП «Минерал») и районов подводных отвалов грунта (по заказу Балтийской Дирекции по обеспечению надзора на море, совместно с Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ). Общий объем геофизического профилирования составил более 400 км (ГЛБО, геолокация). Было отобрано и проанализировано 180 образцов донных осадков. По ряду профилей исследования ведутся в режиме повторных съемок, что позволяет получать информацию о динамике рельефа и осадочного покрова дна Губы.

Кроме того, для анализа многолетних тенденций изменения седиментанционных процессов были использованы результаты аэрофото- и космосъемки ФГУП НИИКАМ, литературные данные и архивные (в том числе картографические) материалы Российского государственного архива (РГА) ВМФ.

Седиментационные процессы в Невской губе

Поверхностные осадки дна Невской губы представлены широким спектром гранулометрических разновидностей от грубообломочных отложений до пелитово-алевритовых илов (рис.1).

Расчетная глубина волнового воздействия в Невской губе может достигать 8 м [1], поэтому практически вся ее донная поверхность, естественные глубины в которой, как правило, не превышают 5 м, в той или иной степени относится к площади волнового поля. Тем не менее, в западной части Невской губы, характеризующейся максимальными естественными глубинами (более 4 м), в настоящее время развиты пелитовые алевриты и алевро-пелиты.

Следует отметить, что устойчивая аккумуляция илов в восточной части Финского залива за пределами Невской губы происходит, как правило, во впадинах донного рельефа («геоморфологических ловушках») на глубинах более 20–30 м. Анализируя данные, полученные в ходе работ ВСЕГЕИ с 1987 по 1990 г. в Невской губе, В.П. Бутылин впервые высказал предположение о том, что слой илов, лежащих на литориновых песках и имеющий мощность от 0,4 до 1,0 м, является чрезвычайно молодым. Ранее (в позднем голоцене) условий для накопления алевро-пелитовых осадков в Невской губе не существовало. Об этом свидетельствовала однородность описываемого слоя по геохимическим параметрам, а также отчетливо проявленное загрязнение илов техногенными поллютантами — тяжелыми металлами, нефтепродуктами и т.д. [1].

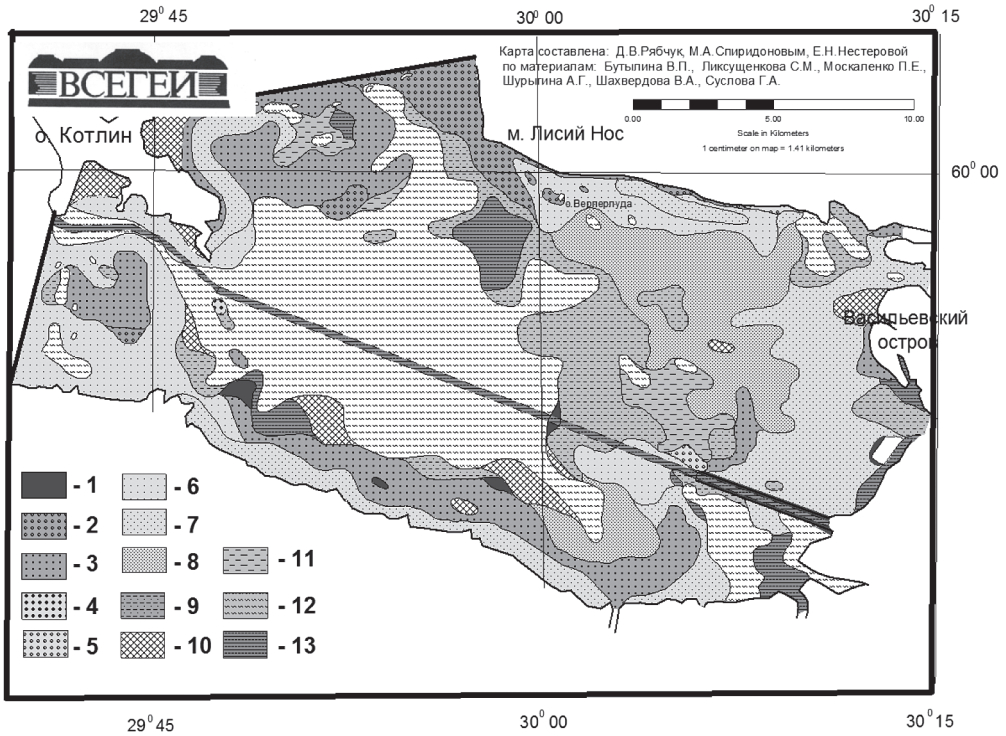

Рис.1. Карта распределения поверхностных донных отложений в Невской губе (по результатам геологических исследований ВСЕГЕИ в 1987–2002 гг.).
Условные обозначения: *1* — грубообломочные отложения; *2* — пески с гравием и галькой; *3–8* — пески: *3* — разнозернистые; *4* — грубо-крупнозернистые; *5* — крупно-среднезернистые; *6* — средне-мелкозернистые; *7* — мелкозернистые; *8* — тонкозернистые; *9* — пески алевритовые; *10* — алевриты песчано-глинистые; *11* — алевриты; *12* — илы пелитово-алевритовые; *13* — подводные обнажения

Изучение архивных материалов позволило получить интересные данные, подтверждающие эти выводы. Наиболее ранний из дошедших до нашего времени судовых гидрографических журналов с описанием «грунтов» датируется 1751 г. (РГА ВМФ, 913-1-79). Схематические описания донных осадков стали обязательными при гидрографических работах с начала XIX в. согласно инструкции директора гидрографического депо Главного Морского Штаба генерал-майора Шуберта «О съемках Балтийского моря в 1829 году», которая содержала требование о ведении журнала, где в каждой точке указывались бы глубины (по лотлиню или футштоку), привязка судна, а также «качество грунта» (РГА ВМФ, 402-1-248). С 1860 г. обозначения типов донных осадков (камень, песок, мелкий песок, ил, хрящ (дресва)) появились на навигационных картах.

Проанализировав записи журнала гидрографических работ за 1751 г. (РГА ВМФ, 913-1-79) и используя карты Невской губы 1768 и 1805 г. (РГА ВМФ 1331-4-302, 1331-4-333), оказалось возможным осуществить приблизительную привязку точек опробования и галсов промерных работ (рис. 2). При работе с архивными материалами

точность привязки может оказаться достаточно серьезной проблемой. В данном случае решению этой проблемы помогла специфика Невской губы — привязка в XVIII в. осуществлялась, как правило, с использованием в качестве ориентиров шпилей соборов и естественных объектов (мысов) (рис. 3).

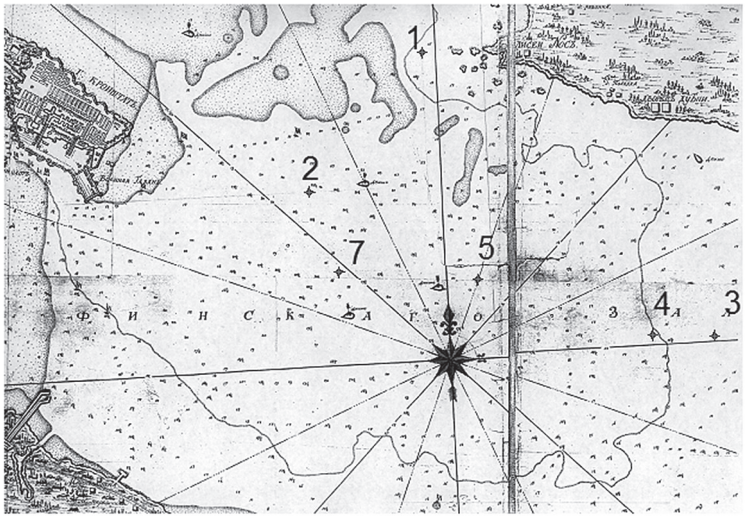

Рис. 2. Фрагмент карты Невской губы 1805 г. (западная часть) с приблизительным обозначением станций пробоотбора по журналу 1751 г.

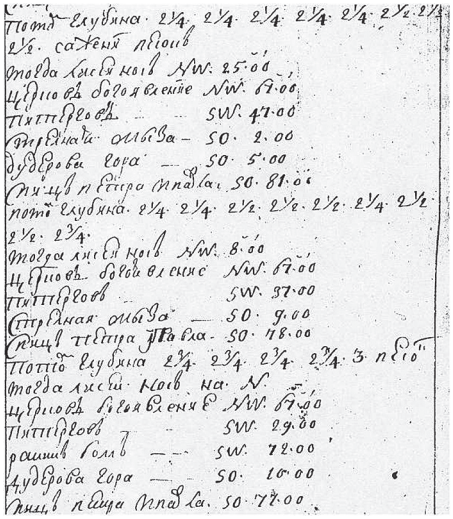

Рис. 3. Фрагмент страницы бортового журнала гальета «Рак» (штурманы Василий Раков и Матвей Верховцев, 1751 г.) с привязкой профиля гидрографического промера (РГА ВМФ, 913-1-79)

В районе условно поставленной нами точки 1 (рис. 2) при промере 1751 г. шесть раз упоминается «песок» и три раза — «камень», что полностью соответствует современной ситуации (поле гравийных песков зоны размыва). При промере в районе точек 2, 4, 5 и 7, т.е. в зоне, где в настоящее время развиты алевро-пелитовые илы, в 1751 г. описан песчаный грунт (рис. 2).

Илистые осадки упоминаются при промере в восточной части губы, в районе точки 3 описан переход от ила к песку «... пошли на WNW, глубина была 2, 2, 2, 2, 2 сажени грунт ил 2, 2, 2, 2, 2 сажени песок 2, 2, 2, 2, 2.25 сажени песок мелкий...» (РГА ВМФ, 913-1-79, с.192). При этом под «илом» в данном случае, по-видимому, понимаются разжиженные алевритовые и песчано-алевритовые осадки, широко развитые в восточной части Губы и в настоящее время.

На навигационных картах конца XIX в. в понижении дна в западной части Губы, где в настоящее время происходит образование илов, обозначены пески и мелкие пески (рис. 4).

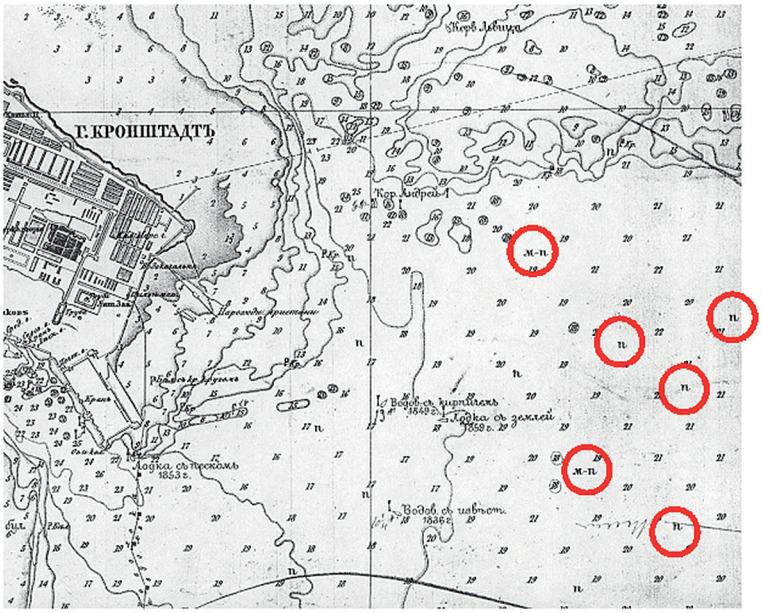

Рис. 4. Фрагмент карты Невской губы, 1860 г. (РГА ВМФ, 1331-11-514). Отмечены обозначения типа грунта «п» (песок) и «м-п» (мелкий песок)

В 1920–1924 гг. профессором К.М. Дерюгиным — основателем первой в вузах страны кафедры Ихтиологии и гидробиологии с объединенными гидробиологической и ихтиологической направленностями в учебном процессе (в Ленинградском государственном университете) [10] были организованы комплексные экспедиции в Невской губе, в ходе которых отбирались пробы донных осадков. Основные станции наблюдения были расположены по линии Новый Петергоф — Лисий Нос, что позволило

выявить латеральные изменения поверхностных осадков в западной части Губы. С юга на север К.М. Дерюгиным были выделены области развития «смешанных грунтов», где «галька, камни и крупный песок» залегали на поверхности глин; илисто-глинистые осадки, развитые в центральной части «западной котловины» (станции II, III) и «речные пески типа гравия» в районе Лисьего Носа [6] (рис. 5).

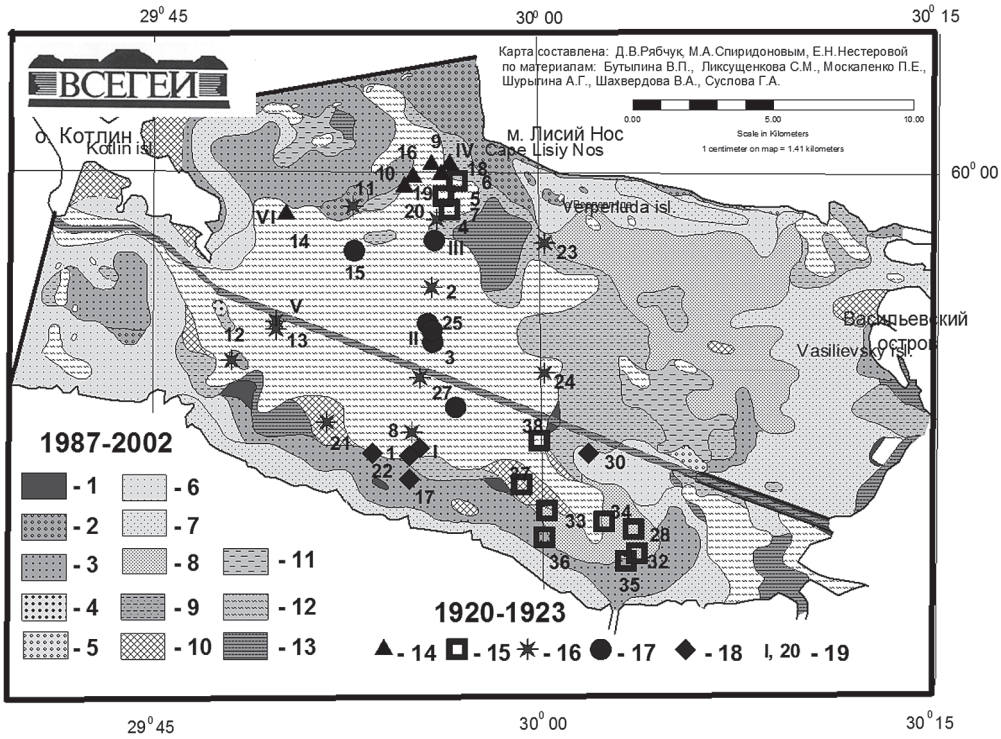

Рис. 5. Сравнение типов поверхностных осадков Невской губы по современным данным и материалам экспедиции К.С. Дерюгина (1920–1923 гг.).
Условные обозначения: *1–13* — на рис. 1; *14–19* — точки опробования экспедиции 1920–1923 гг.: *14* — пески с гравием; *15* — пески; *16* — песчано-глинистые осадки; *17* — алевро-пелитовые илы; *18* — подводные обнажения; *19* — номера точек опробования

Сравнение результатов работ 1920–1924 гг. с данными последних десятилетий показывает, что к 1920 г. в центральной части губы уже существовало поле алевро-пелитовых осадков, однако оно было значительно меньшим по площади, чем в настоящее время. Выполненные К.М. Дерюгиным гранулометрические анализы образцов позволяют сделать вывод о том, что механический состав илов был аналогичен современному (рис. 6), «илисто-глинистым осадкам» по классификации Дерюгина соответствуют пелитовые алевриты [9].

Интересно, что в своей работе К.М. Дерюгин указывает на ошибочность сведений «Лоции русского берега Балтийского моря», где говорится, что «грунт по всей Невской

губе мелкий песок». Анализ как архивных данных, так и результатов работ последних десятилетий показывает, что мы имеем дело не с ошибкой в Лоции, а с изменением лито-фациальной обстановки в «западной котловине» Невской губы.

К югу от указанной площади в 1920–1924 гг. отмечались осадки, характерные для зоны подводного размыва («обнажения озерных глин с маломощным покровным слоем песков и грубообломочных отложений»), к северу от нее располагалось поле песков и гравелистых песков. К востоку от о-ва Котлин отмечалась переходная зона смешанных (песчано-глинистых) осадков. В районе точек наблюдения 23 и 24 [6] на поверхности дна были описаны осадки, соответствующие песчаным алевритам нашей классификации, таким образом, поле последних было значительно больше, чем в настоящее время. В то же время в юго-восточной части губы К.М. Дерюгиным описаны мелкопесчаные осадки, аналогичные современным. Таким образом, можно констатировать, что седиментационная обстановка в Невской губе значительно изменилась за последние 200–250 лет (рис. 7).

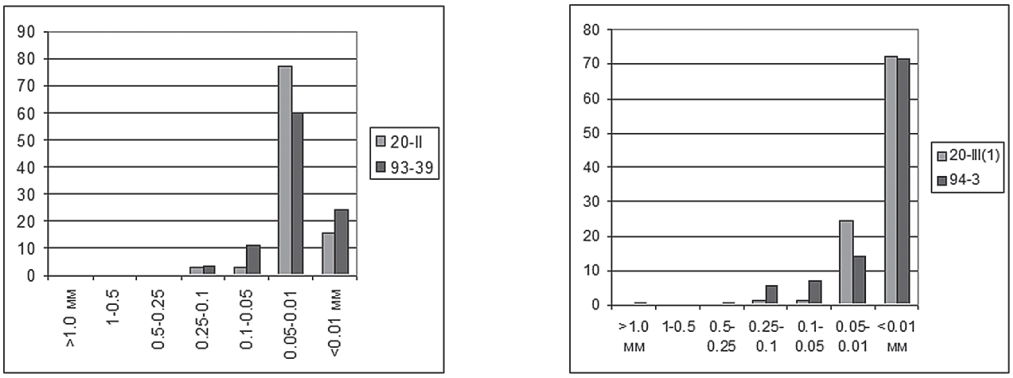

Рис. 6. Сравнительные гистограммы гранулометрического состава глинистых алевритов. Серый цвет — образцы 1920–1923 гг., черный — 1993–1994 гг.

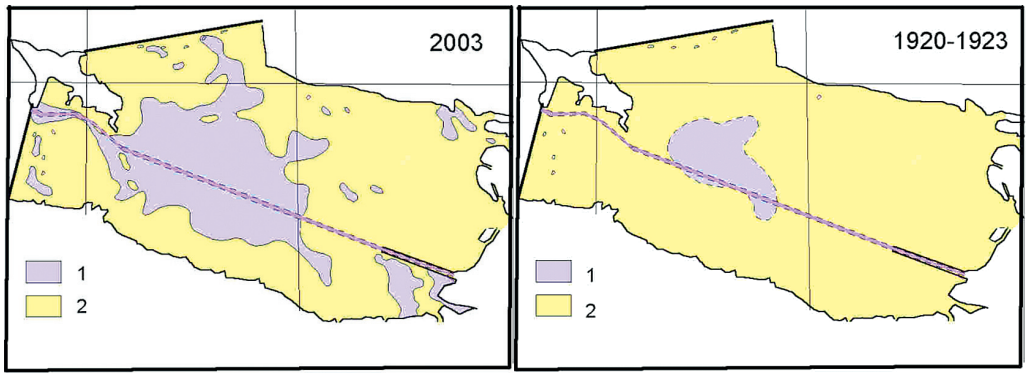

Рис. 7. Область развития алевро-пелитовых илов в начале XX в. и в настоящее время [26]

Полученные результаты были подтверждены в ходе совместных исследования специалистов ВСЕГЕИ и GTK (2004–2005 гг.). По данным пробоотбора в зоне алевропелитовой аккумуляции, максимальная мощность слоя илов составила 44 см.

Выполненные специалистами GTK послойные химические анализы (определение содержания Cd, Cu, Zn, Pb методами ICP-AES и ICP-MS) показали, что кривые изменения содержания тяжелых металлов по разрезу колонок сходны между собой (рис. 8).

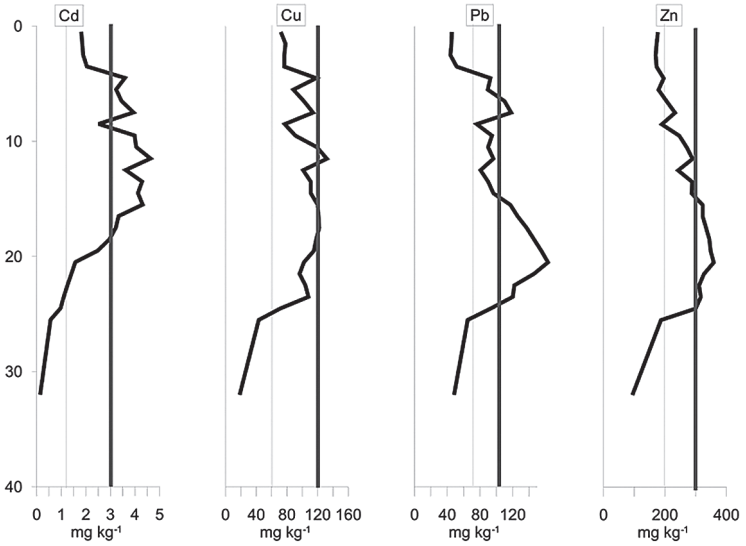

Рис. 8. Кривые изменения концентраций тяжелых металлов в илах Невской губы. По вертикали — интервал опробования в сантиметрах. Вертикальные серые линии соответствуют уровню очень высокого загрязнения (Шведский стандарт (Swedish EPA, Vallius, Leivuori, 2003)) [32]

В колонках четко выделяются осадки, сформировавшиеся в «доиндустриальную эпоху», постепенное нарастание содержания тяжелых металлов в 1950–1990 гг. и уменьшение концентраций на протяжении последнего десятилетия. Весь слой современных илов согласно полученным данным сформировался за промежуток времени около 100 лет [32]. Скорости седиментации илов в центральной части Невской губы составляли 0,2–0,3 см/год.

В результате подводной добычи песка в районе Северной Лахты рельеф здесь приобрел сильно расчлененный характер с чередованием впадин глубиной до 12–14 м и останцов песчаных осадков, вершины которых находятся на глубине 2–3 м (рис. 9). Небольшие по площади участки накопления алевро-пелитового материала, приуроченные к подводным карьерам, были впервые зафиксированы при проведении геологической съемки в районе Лахты, поселка Ольгино, у Васильевского острова, напротив устья рек Малая и Средняя Невка [1]. Подводные карьеры превратились в своеобразные «седиментационные ловушки», скорость осадконакопления могла достигать в 3–5 см/год [1].

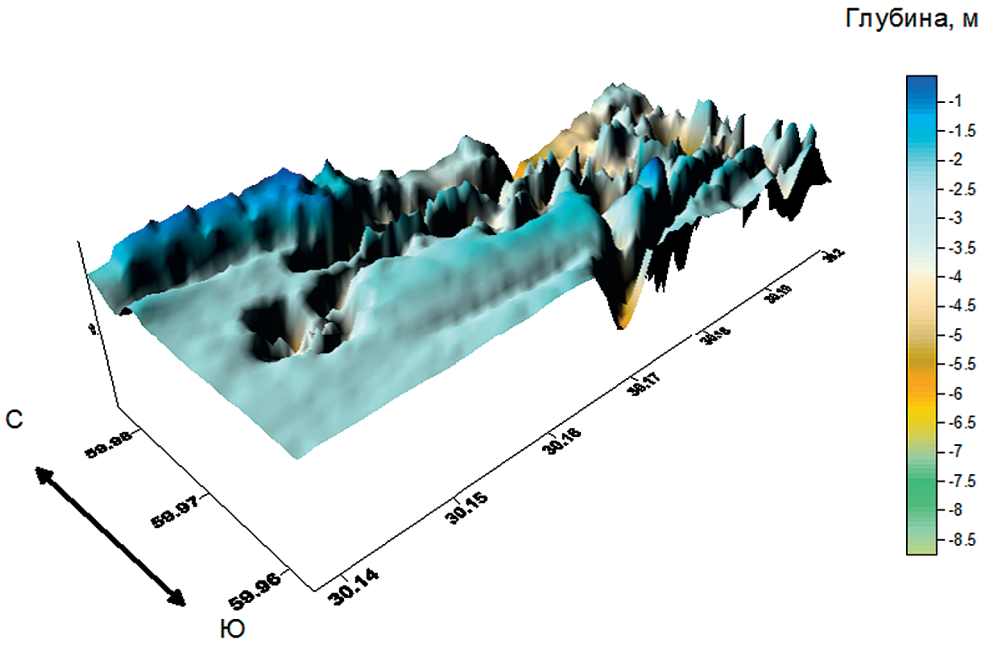

Рис. 9. Трехмерная диаграмма рельефа поверхности дна в районе Северной Лахты

По данным исследований 2004–2005 гг. скорость накопления илов в подводных карьерах района Северной Лахты превышает 1,5 см/год. Осадки однородные, черного цвета, с гнилостным запахом, интенсивно загрязненные нефтепродуктами.

О дальнейшем расширении зоны алевропелитовых илов свидетельствуют также результаты подводных видеонаблюдений, проведенных в 2004 г. Слой обводненных флоккулированных илов мощностью до 20 см был обнаружен на эрозионной поверхности валунно-галечного бенча в северо-западной части Невской губы, на глубинах 2–3 м. Очевидно, что в данном случае процесс накопления илов является неустойчивым, так как осадки формируются непосредственно в зоне волнового воздействия.

Процессы слабо проявленного накопления алевро-пелитовых осадков были зафиксированы в ходе наблюдений 2000–2007 гг. в прибрежной зоне в районе о-ва Верперлуда, где в последние годы наблюдается интенсивный рост макрофитов. По данным специалистов НИИКАМ [3], динамика развития зоны макрофитов хорошо видна на аэрокосмоснимках. Размеры и конфигурация этой зоны варьируют, что объясняется как природными, так и антропогенными факторами. В целом, за последние десятилетия зона развития водной растительности значительно расширилась, в то время как на прилегающем к ней участке суши усиливаются процессы заболачивания [23]. Все это приводит к образованию поверх развитых здесь мелкозернистых песков алевро-пелитового наилка мощностью до 5–10 мм, богатого органическим веществом.

Резкие изменения характера поверхностных осадков были отмечены после 2006 г. По данным опробования 1987–1992 и 2000–2004 гг., дно прибрежных мелководий

северной береговой зоны Невской губы было сложено, в основном, песчаными осадками. По данным бурения, мощность слоя песчаных и алевро-песчаных осадков достигала 2–2,5 м. Работы 2007 г. показали, что на 28 станциях из 35 поверхность дна покрыта тонкозернистыми осадками (илы, обводненные глины). В центральной и западной части полигона тонкие осадки полностью формировали поверхностный слой до 5 см мощностью, в восточной части — слой наилка мощностью до 3–5 мм на поверхности песков. Экспедиционные исследования 2008 г. зафиксировали расширение зоны развития описываемых осадков (рис. 10). В меньших масштабах (наилок мощностью доли мм) процессы отложения тонкодисперсного материала на поверхности дна зафиксированы и к западу от КЗС, в субаквальной части как северной, так и южной береговой зоны залива.

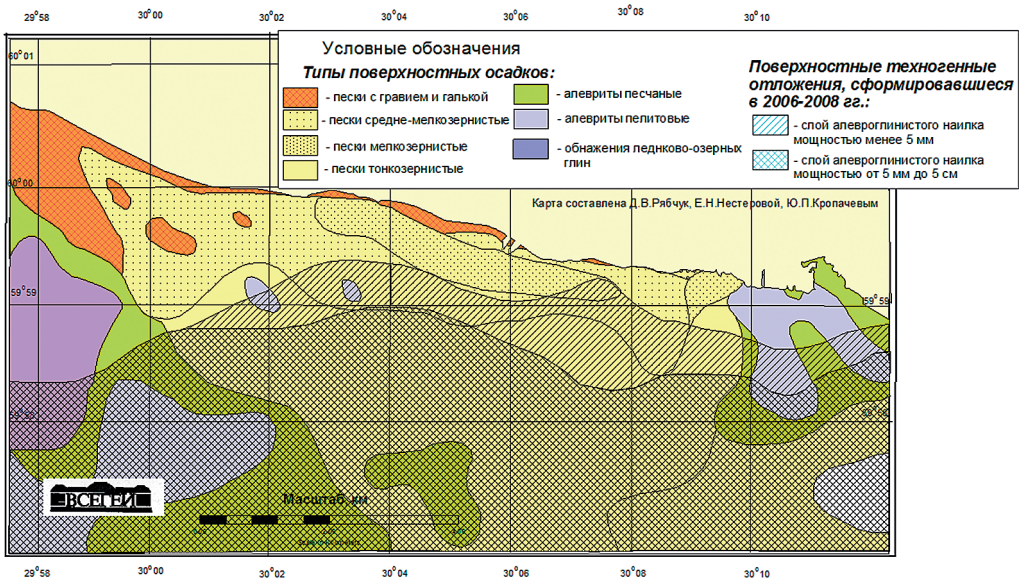

Рис. 10. Литологическая карта поверхности дна субаквальной части северной береговой зоны Невской губы

Таким образом, можно констатировать наличие четкой тенденции к изменению седиментационной обстановки в Невской губе в сторону постепенного замещения естественных песчаных и алевро-песчаных образований алевро-глинистыми осадками. Постепенные изменения седиментационной обстановки отмечаются на протяжении нескольких столетий, в последние годы скорость процесса резко возросла.

Обсуждение полученных результатов — причины изменения седиментационной обстановки

В восточной части Невской губы донные осадки формируются, в основном, под воздействием стокового течения Невы. Масса влекомых наносов р. Невы составляет

65 тыс. т в год, а взвешенных достигает 510 тыс. т в год [12]. При этом большинство исследователей [11, 4, 27] сходится на том, что значительная масса наносов р. Невы накапливается непосредственно в пределах Невской губы. Снижением скорости потока определяется латеральное распределение поверхностных осадков — с востока на запад здесь образуются песчаные (мелко- и тонкозернистые пески) и алевро-песчаные (алевритовые пески, песчаные алевриты, алевриты) осадки аллювиально-морского происхождения. Следует отметить, что в Невской губе значительно более широко развиты (по сравнению с районами к западу от КЗС) осадки с высоким содержанием алевритовых частиц (0,05–0,005 мм). Это объясняется составом взвеси р. Невы, в которой на крупноалевритовую фракцию приходится 83 % [15].

Как упоминалось выше, алевро-пелитовые осадки развиты в пределах Невской губы на глубинах, подвергающихся воздействию волнения. Естественными предпосылками развития зоны современной алевро-пелитовой аккумуляции в Невской губе является характер рельефа дна с уменьшением глубины моря к северу и югу от о-ва Котлин, что создает своеобразную «седиментационную ловушку», а также поступление тонкодисперсного материала с твердым стоком р. Невы и в результате размыва озерно-ледниковых отложений суши и поверхности дна.

В то же время с момента основания Санкт-Петербурга техногенные процессы начали оказывать определенное влияние на седиментацию в Губе. Так, возведение ряжевых преград усилило контрастность рельефа в западной части Невской губы [11], строительство фортов и фарватеров приводило к взмучиванию и переотложению тонкодисперсного материала. Наибольшую интенсивность техногенные процессы приобрели во второй половине XX в.

Как показали многолетние исследования специалистов НИИКАМ [28, 2], гидротехнические работы по выемке грунта и намыву городских территорий и периодические дноуглубительные работы в районах Лахты и Южной Лахтинской отмели стали основными источниками поступления в губу тонкодисперсного материала в конце 80-х — начале 90-х гг. Применявшаяся технология грунтозаборных и дноуглубительных работ создавала условия, при которых более 30 % добываемого из подводных карьеров грунта в виде тонкодисперсной пелитовой взвеси поступало в Невскую губу и восточную часть Финского залива. Максимальные концентрации взвешенных веществ в прилегающих к намыву зонах акватории достигали 200 мг/л, т.е. более чем на порядок превосходили фоновые концентрации взвеси в исследуемом районе и наблюдались на протяжении всего навигационного периода. Описанная картина хорошо видна на широко известных снимках Невской губы, сделанных в 1989–1992 гг.

Накоплению тонких осадков способствовала также засыпка грунта при постройке КЗС. Сделанные выводы хорошо согласуются с данными других источников. По результатам детального гранулометрического и минералогического анализа 22-х образцов донных осадков Невской Губы [13] были выявлены значительные изменения в распределении гранулометрических типов осадочных образований, произошедшие в результате намывных и насыпных работ на КЗС. Отмечено отчетливое возрастание в этих осадках пелитового материала, повышение контрастности в распределении тяжелых минералов, что свидетельствует об уменьшении в Невской губе подвижности придонных вод.

Произошедшие изменения нашли отражение на литологических и лито-фациальных картах Невской губы и отдельных ее участков, составленных специалистами ВСЕГЕИ при обобщении данных по состоянию на 1993 г. [5]. В 1990 г. работы по намыву новых территорий сократились, а в 1993 г. — полностью прекратились [14]. По данным специалистов НИИКАМ [28, 2], это резко повлияло на характер распределения взвеси. К 1998 г. значительно уменьшилась концентрация взвеси в поверхностных водах и сократилась суммарная площадь распространения взвешенного материала. По сравнению с 1980 г. концентрация взвеси сократилась в 3–4 раза. Тем не менее в целом, уже к началу XXI в. техногенные процессы существенно изменили седиментационную обстановку в Невской губе. В ходе работ ВСЕГЕИ 2004–2005 гг. [27] были выявлены и закартированы многочисленные техногенные объекты и формы рельефа (фарватеры, карьеры, подводные свалки грунта, отвалы, возникшие при строительстве фортов и т.д.). В западной части губы сформировалась значительная по площади зона накопления алевро-пелитовых илов, по периферии которой выделяется зона ненакопления (транзита), представленная трехкомпонентными алевро-глинисто-песчаными осадками. Сформировались техногенные фации донных осадков, среди которых могут быть выделены:

– фация судоходных путей, включающая в себя искусственные каналы и фарватеры, на дне которых формируется тонкий слой алевро-пелитовых илов, обогащенных различными видами загрязнителей;
– фация портовых акваторий, к которой относятся искусственно углубленные участки морского дна в пределах портовых акваторий, где также накапливаются интенсивно загрязненные алевро-пелитовые илы;
– фация подводных карьеров, возникших при выемке грунта в юго-восточной части губы и в районе Лахты;
– фации склонов инженерно-технических сооружений, представленные валунно-галечными отложениями, сформировавшимися за счет частичного разрушения дамб и стенок Морского канала, а также искусственных набросок.

Новые резкие изменения седиментационные процессы претерпели с началом строительства пассажирского порта в 2006 г. содержание взвеси в воде резко возросло. Интенсивность техногенного воздействия, обусловившая высокую нагрузку на акваторию, в данном случае связана с одновременным осуществлением работ по намыву новых территорий, дноуглублению в пределах фарватеров и дампингу в районах Южной и Северной Лахты. По данным Балтийской дирекции по техническому обеспечению надзора на море [8], в отвалы Северной и Южной Лахты за период 2005–2008 гг. было сброшено 21,391451 млн м^3 грунта, изъятого при реконструкции фарватеров вблизи восточных берегов Невской губы и при реализации первой очереди проекта «Морской фасад» (пассажирский порт Санкт-Петербурга). Динамика сброса грунта выглядит следующим образом:

– 2005 г. — 1,233195 млн м^3;
– 2006 г. — 12,199286 млн м^3;
– 2007 г. — 7,533176 млн м^3;
– 2008 г. — 0,425794 млн м^3 [8].

Сброс грунта производился с помощью пульпопроводов, оборудованных специальными рассеивателями для равномерного распределения сбросов по площади. Это более экономичный способ, чем перевозка шаландами, но менее приемлемый с точки зрения экологии именно для данного района, который является транзитной зоной эстуария Невы. Взмученные легкие фракции глинистого грунта распространялись со шлейфами мутных вод далеко от зоны сброса, благодаря чему зона рассеивания на порядки превысила площадь отвалов. Кроме того, в изначально мелководных отвалах Северной и Южной Лахты появились зоны переполнения (уменьшения глубин менее проектной отметки), которые представляют собой опасность для судоходства [8, 30].

Сразу после начала работ концентрация взвеси в воде Невской губы резко возросла. Анализ ряда космических снимков восточной части Финского залива, полученных с ИСЗ Terra/MODIS и Aqua/MODIS в летний период 2006–2008 гг., позволяет заключить, что масштабы загрязнения акватории взвесью (соответственно, и другими видами сопутствующих им загрязнений) очень велики (рис. 11). Объемы работ и интенсивность загрязнения превосходят отмечавшиеся ранее вследствие проведения работ по намыву городских территорий (в 1970-е — 1980-е гг.).

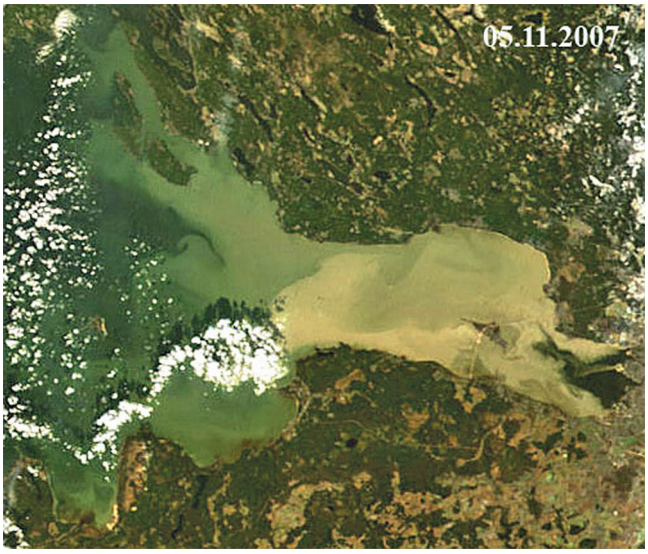

Рис. 11. Распределение взвешенных веществ в Невской губе и в восточной части Финского залива, по данным Aqua/MODIS за 5 ноября 2007 г. В Невской губе продолжаются гидротехнические работы по осуществлению проекта «Морской фасад», а в районе южного створа дамбы, со стороны залива, ведутся работы по завершению строительства КЗС

Работы ВСЕГЕИ 2007 г. в северной береговой зоне Невской губы показали, что на поверхности дна формируется слой «техногенных» глинистых осадков. Изучение распределения в поверхностном слое осадков (0–2 см) радионуклидов показало, что в нем практически отсутствует 137Cs, что абсолютно не характерно для современных

алевро-пелитовых илов Невской губы. Полученные данные подтверждают предположение о том, что слой поверхностных алевро-глинистых осадков сформирован переотложенными ледниково-озерными глинистыми отложениями и является результатом активных гидротехнических работ, причем скорость «техногенной» седиментации является чрезвычайно высокой. В меньших масштабах процессы отложения тонкодисперсного материала на поверхности дна зафиксированы и к западу от КЗС, в субаквальной части как северной, так и южной береговой зоны залива.

Техногенные глинистые осадки в ряде случаев залегают на поверхности дна в зонах современного воздействия волнения и придонных течений и в дальнейшем могут стать источником вторичного загрязнения акватории.

Следует учесть возможные изменения в гидродинамике в связи с началом функционирования пассажирского порта на Васильевском острове, который планирует принимать крупные круизные суда. По данным эстонских специалистов, после открытия регулярной линии паромного сообщения Таллинн — Хельсинки, высокоскоростные паромы индуцируют в Таллиннской бухте волны высотой около 1 м с периодом 10 с, что сравнимо по воздействию на дно и берега с наиболее сильными штормами. В настоящий момент так называемые «судовые волны» создают от 18 до 35 % волнового воздействия на берег. Воздействие «судовых волн» на дно проявляется, прежде всего, во взмучивании осадка [31.

Выводы

1. История регулярных исследований рельефа и донных осадков Невской губы насчитывает почти три столетия. Анализ имеющихся архивных и картографических материалов играет важную роль в понимании тенденций изменения седиментационных процессов.
2. Анализ материалов геологической съемки и эколого-геологических работ, а также архивных и картографических материалов показал, что слой илов, лежащих на литориновых песках, является чрезвычайно молодым. Ранее (в позднем голоцене) условий для накопления алевро-пелитовых осадков в Невской губе не существовало. На протяжении последнего столетия зона современной алевро-пелитовой аккумуляции постоянно расширяется.
3. Изменение седиментационной обстановки в Невской губе обусловлено как природными (характер рельефа дна, с уменьшением глубины моря к северу и югу от о-ва Котлин, что создает своеобразную «седиментационную ловушку»; изменение стока р. Невы), так и техногенными (строительство фортов, ряжевых преград, гидротехническое строительство).
4. В настоящее время интенсивный техногенез стал доминирующим лито- и морфодинамическим фактором в Невской губе. На значительной площади дна сформировался покров глинистых техногенных осадков. При дальнейших работах необходимо проведение моделирования гидро-, морфо- и литодинамических процессов с учетом измененного в результате техногенеза рельефа дна, структуры осадочного покрова, а также возможных изменений гидродинамических процессов в связи с началом функционирования пассажирского порта.

Авторы благодарны сотрудникам отдела Региональной геоэкологии и морской геологии ВСЕГЕИ, принимавшим в разные периоды времени участие в полевых исследованиях, А.Г. Григорьеву, С.Ф. Мануйлову, А.Г. Шурыгину, капитану и экипажу НИС «Риск», а также работникам Государственного Архива ВМФ за помощь в поиске архивных материалов.

Литература

1. *Бутылин В.П., Шурыгин А.Г.* Современный седименто- и морфогенез в восточной части Финского залива. Осадочный покров гляциального шельфа северо-западных морей СССР. — СПб.: ВСЕГЕИ, 1992, с. 118–123.
2. *Бычкова И.А., Викторов С.В., Сухачева Л.Л.* Аэрокосмический мониторинг водных ресурсов Санкт-Петербурга и Ленинградской области. // Разведка и охрана недр, 1998, № 7–8, с. 42–44.
3. *Бычкова И.А., Викторов С.В., Кильдюшевский Л.Л., Сухачева Л.Л.* Синергетический подход к использованию аэрокосмической информации для изучения прибрежных зон. // Отечественная геология, 1999, № 6, с.40–46.
4. Геология Финского залива. Под ред. А. Раукаса и Х. Хюваринена. — Таллинн: изд-во АН Эстонии, 1992. — 422 с.
5. Геоэкологический атлас восточной части Финского залива. РАН, ВСЕГЕИ, МПР РФ. Под ред. В.М. Питулько и М.А. Спиридонова. — СПб., 2002. — 50 с.
6. *Дерюгин К.М.* Исследования реки Невы и ее бассейна, № 63, вып. 2. Гидрологические и гидробиологические исследования Невской губы. — Петроград: изд-во Российского гидрологического института, 1923.
7. *Дерюгин К.М.* Исследования реки Невы и ее бассейна, № 103, вып. 2. Гидрологические и гидробиологические исследования Невской губы. — Л.: изд-во Российского Гидрологического института, 1925.
8. *Зайцев В. М., Клеванный К. А., Лукьянов С. В., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Шилин М.Б.* Оценка экологического состояния подводных отвалов грунта в Невской губе. // Инженерные изыскания, 2010, № 5, с.36–42.
9. Инструкция по составлению и подготовке к изданию листов государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1: 200000. — М.: Роскомнедра, 1995. — 244 с.
10. *Краюшкина Л.С., Максимович Н.В.* Кафедре Ихтиологии и гидробиологии 80 лет. // Вестник Санкт-Петербургского университета, 2009, сер. 3, вып. 3, с. 3–10.
11. *Логвиненко Н.В., Барков Л.К., Усенков С.М.* Литология и литодинамика современных осадков восточной части Финского залива. — Л., Изд-во ЛГУ, 1988. — 148 с.
12. *Нежиховский Р.А.* Вопросы гидрологии р. Невы и Невской губы. — Л.: Гидрометиздат, 1988. — 108 с.
13. *Окнова Н.С., Лопатина С.К., Верзилин Н.Н., Гонтарев Е.А.* К вопросу изменения донных осадков Невской губы в связи со строительством дамбы. // Вестник ЛГУ. Геология, география, 1990, вып. 3, с. 12–20.
14. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге. Администрация Санкт-Петербургского управления охраны окружающей среды. — СПб., 2000. — 515 с.
15. *Пустельников О.С.* Взвешенное вещество бассейна Балтийского моря. Речная взвесь и ее роль в общем балансе осадочного материала. // Труды АН Лит.ССР, 1976, серия Б, т. 96, № 5, с.139–146.
16. РГА ВМФ, 402-1-248. Дело № 9. О съемках Балтийского моря в 1829 г., 1829.
17. РГА ВМФ, 913-1-79. Журнал плаваний палубного бота № 4, гальета «Рак» и гальета «Штурман» по Балтийскому морю для гидрографических и гидрологических работ, 1751.
18. РГА ВМФ, 1331-4-281. Карта части Финского залива от Санкт-Петербурга до о-ва Гогланда, 1750.
19. РГА ВМФ, 1331-4-302. Карта Глубин от устья Невы до Кронштадта, 1768.
20. РГА ВМФ, 1331-4-333. Карта невской губы, 1805.
21. РГА ВМФ, 1331-7-532. Карта Невской губы, 1911.
22. РГА ВМФ, 1331-11-514. Карта Невской губы, 1860.
23. *Рябченко В., Шилин М., Еремина Т.* 8-й научный конгресс по Балтийскому морю. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 20, с. 226–227.

24. *Спиридонов М.А., Суслов Г.А.* Геоэкология (экологическая геология) береговой зоны восточной части Финского залива. // Экологическая геология и рациональное природопользование. — СПб., 2000, с. 132–136.
25. *Спиридонов М.А., Григорьев А.Г., Шахвердов В.А. и др.* Важнейшие геоэкологические особенности системы река Нева — Невская губа — Финский залив. // Геология Северо-запада вчера и сегодня. — СПб., 2002, с.189–193.
26. *Спиридонов М.А., Рябчук Д.В., Кропачев Ю.П., Суслов Г.А., Нестерова Е.Н., Ликсущенков С.М.* Создание современной фактографической карты донных осадков и техногенных объектов на поверхности дна Невской губы (район, ограниченный Комплексом защитных сооружений, до условной линии Ломоносов — м. Лисий Нос). // Известия ВСЕГЕИ, 2004, т. 4(52), с.120–123.
27. *Спиридонов М.А., Рябчук Д.В., Шахвердов В.А., Звездунов С.И., Нестерова Е.Н., Суслов Г.А., Григорьев А.Г.* Невская губа. Эколого-геологический очерк. — СПб.: изд-во «Литера», 2004. — 181 с.
28. *Сухачева Л.Л.* Исследование разномасштабной пространственно-временной изменчивости распределения полей взвеси в восточной части Финского залива по данным многолетних аэрокосмических наблюдений. // Исследование Земли из космоса, 1996, № 5, с. 85–93.
29. *Шилин М.Б., Еремина Т.Р., Мамаева М.А.* Дреджинг наводит мосты. В кн.: Экологические аспекты дреджинга. — СПб.: изд. РГГМУ, 2013, с. 427–435.
30. *Shilin M., Lukjanov S., Zhakova L., Mamaeva M., Lednova J.* Assessing the status and trends of the coastal ecosystems in the dredging material deposit areas. // 8 th Baltic Sea Science Congress. — SPb, 2011. — 221 p.
31. *Torsvik T., Soomere T.* Simulation of patterns of waves from high-sped ferries in Tallinn Bay. // Estonian Journal of Engineering, September 2008, vol. 14, no. 3, pp. 232–254.
32. *Vallius H., Ryabchuk D., Kotilainen A., Spiridonov M., Suslov G., Zhamoida V.* Pollution history of thr Neva Bay since the foundation of the city of St.Petersburg (1703 AD). // The Baltic Sea geology: The Ninth Marine Geological Conference. Extended abstracts. University of Latvia, Riga, 2006, pp. 115–116.

ДНОУГЛУБЛЕНИЕ И ДРЕДЖИНГ

О.Ю. Корнеев, А.Е. Рыбалко, Н.К. Федорова

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДРЕДЖИНГА В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ

O.Yu. Korneev, A.E. Rybalko, N.K. Fedorova

GEOECOLOGICAL ASPECTS OF DREDGING IN THE GULF OF FINLAND

Рассмотрены основные последствия дреджинга для окружающей среды на примере российской части Финского залива. Показано изменение гео-гидрохимических характеристик в водной толще и в донных осадках вследствие проведения дреджинговых работ в акватории восточной части Финского залива.

Ключевые слова: дреджинг, Финский залив, прозрачность, загрязнение воды, загрязнение донных осадков, геохимия, гидрохимия.

The main consequences of dredging for environment on the example on Russian part of Finland Gulf are analyzed. The changing of geo-hydrochemistry characteristics in water column and bottom deposits in consequence of realization of dredging works in the water area of Eastern part of Finland Gulf are shown.

Key worlds: dredzhing, Gulf of Finland, transparency, water pollution, pollution of bottom sediments, geochemistry, hydrochemistry.

Дноуглубительные работы являются одним из основных факторов нарушения устойчивости геологической среды в морских и озерных бассейнах [2, 5, 7]. При этих работах происходит продуцирование большого количества взвеси, разносимой на значительные расстояния. Сами подводные выработки за счет относительного углубления по сравнению с преобладающими глубинами не только оказывают возмущающее влияние на характер гидрологических процессов, но и являются, по существу, крупными отстойниками для накопления взвешенного материала и сорбированных на нем продуктов загрязнения. Большое значение имеет также химический состав разрабатываемых грунтов. В случае содержания в них повышенных концентрации токсикантов, загрязнение донных отложений неминуемо. В настоящее время дноуглубительные работы проводятся при:

- образовании новых гаваней и их углублении;
- строительстве подходных каналов и их углублении;
- добыче инертных строительных материалов со дна водных бассейнов;
- строительстве различных гидротехнических сооружений.

Следует отметить, что другой вид гидротехнических работ, а именно намыв новых территорий, который на Финском заливе практикуют как Россия, так и Финляндия,

наносит меньший урон окружающей среде, так как проводится на уже подготовленных в инженерном отношении территориях.

Рассмотрим основные последствия дреджинга для окружающей среды на примере российской части Финского залива. Здесь в 2006–2007 гг. осуществлялось несколько крупномасштабных проектов, связанных со строительством нового пассажирского терминала на Васильевском о-ве и ряда грузовых терминалов в Усть-Лужском порту. Кроме того, в Невской губе проводились работы, связанные с завершением строительства комплекса защитных сооружений, реконструкции стадиона на Крестовском о-ве, строительства района «Балтийская жемчужина», а также плановые работы по поддержанию эксплуатационного состояния Морского канала и его отвлетвления в сторону Константиновского дворца. Для выполнения этих проектов в довольно сжатые сроки был выполнен громадный объем дноуглубления, преимущественно в Морском канале, подходном фарватере, а также на строительстве ковша Пассажирской гавани южнее устья р. Смоленки [6]. Так, только на строительстве «Морского Фасада» за 2005–2006 гг. объем перемещенных грунтов составил 13,4 млн м^3 из запланированных 18,8 млн м^3. Всего в восточной части Финского залива по перспективным планам по сведениям, приведенным Б.П. Усановым с соавторами, планируется переместить 64,3 млн м^3 грунта [4].

Одновременное выполнение нескольких проектов по дноуглубительным работам с использованием мощных, преимущественно голландских землесосов, в практически изолированной Невской губе с затрудненным водообменом, привело к продуцированию огромного количества взвешенных частиц, которые в первые годы привели к резкому сокращению прозрачности водной толщи (до первых десятков сантиметров). Наличие незавершенного комплекса защитных сооружений усугубило это положение как с точки зрения водообмена, так и из-за проводящихся гидротехнических работ по завершению строительства судопропускного сооружения № 1 на Морском канале. Изменение мутности хорошо иллюстрируется данными мониторинга, выполненного ОАО (в те годы ФГУНПП) «Севморгео» в 2006 г., которые убедительно показывают, что с весны этого года до осени объем взвешенного материала практически на всей площади губы вырос на несколько порядков. В мае этого года максимальные значения мутности составляли 91 единиц FTU и отмечались в первую очередь вдоль южного берега. В летний период аномально высокие показатели мутности практически распространились по площади всей губы, причем наиболее высокие ее значения составили от 100 до 413 единиц FTU. В октябре месяце показатели мутности придонных вод уже доходили до 1000 единиц FTU, т.е превосходили первоначальные более чем на два порядка. При этом, из-за разработки для новой Пассажирской гавани на Васильевском о-ве его фронтального склона, во многом сформированного бытовым мусором, который использовался для формирования новых городских территорий в 60-е гг. прошлого века, в воде появилось большое количество макрозагрязнителей, представленных старыми пакетами, обрывками веревок и пр. При этом вырос и уровень содержаний в воде стойких органических загрязнителей (ПАУ, ПХБ)

Столь резкое увеличение объема взвешенного материала в воде повлияло и на другие гидрохимические характеристики. Так, изменился макрокомпонентный состав придонной воды в Невской губе, где водная толща формируется под определяющим влиянием стока из Ладожского озера [1]. Характерной чертой вод губы является их

ультрапресный гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав с минерализацией от 88 до 115,6 мг/л, что и было зафиксировано в мае 2006 г. Но уже в августе и октябре этого же года минерализация придонных вод (по измерению электропроводности) повысилась по сравнению с майским рейсом в пять раз. При этом вдоль северного берега сформировалась зона кальциевых сульфатно-гидрокарбонатных вод [3]. Как показывают результаты прошедших исследований, появление сульфатов однозначно указывает на загрязнение водной толщи и наблюдается у очистных сооружений или в порту. К осени 2006 г. были отмечены и другие признаки загрязнения водной толщи. Так, впервые было зафиксировано превышение ПДК по нефтеуглеводородам (НУ) в придонной воде, а также фосфора. Произошло также снижение уровня кислорода, что нашло свое отражение почти в полной деградации окисленного слоя донных осадков. При этом произошло не просто ухудшение обстановки в самой Невской губе, но и усилился вынос загрязненных вод в восточную часть Финского залива, что хорошо видно на космических снимках . Облако взвеси уже в 2006 г. достигало о. Сескар и островов Березового архипелага.

Существенные изменения были зафиксированы и в распределении литотипов донных отложений, а также в их геохимической структуре. Наиболее существенным геоэкологическим последствием интенсивных гидротехнических работ в Невской губе в 2006–2007 гг. явилось существенное увеличение площади алевропелитовых осадков, особенно в западной части губы. В 2005 г., до начала интенсивного дреджинга в Невской губе, пелитовые осадки локализовались во впадине в западной части губы, ограниченной изобатой 4,5 м. В 2007 г. площадь этих осадков значительно расширилась. Существенно пелитовые осадки были зафиксированы и в северо-восточной части рассматриваемого района. При этом изменилась структура самих глинистых осадков. В них заметно возросло содержание фракции < 0,01 мм. В отдельных пробах, в том числе в глубоководном районе и в Лахтинском разливе, содержание алевропелитовых частиц превысило 50 %.

Максимально процесс пелитизации донных образований был установлен по данным мониторинга 2007 г., а в 2008 г. содержание тонких частиц несколько снизилось. Все это привело к существенному увеличению сорбционной способности осадков, а снижение значений Eh (а также снижение концентраций растворенного кислорода в придонных водах по данным РГГМУ) обусловило увеличение инфильтрации загрязняющих веществ из донных осадков в придонный слой воды. Изменение распространения полей различного гранулометрического состава может также существенно сказаться и на изменении характера грунтов на рыбных нерестилищах, что неминуемо отразиться в будущем на возможности воспроизводства кормовых рыб в северной Балтике.

Принципиально важным является различный характер изменения гео-гидрохимических характеристик в водной толще и в донных осадках. Измерения конкретных поллютантов в толще воды, по данным федерального мониторинга, свидетельствуют об их сравнительно низких значениях. Практически только по двум металлам — меди и цинку были зафиксированы концентрации выше уровня ПДК. Содержание меди по данным 2008 г. изменялось от 0 до 10,04 мкг/л и в среднем составляло 4,18 мкг/л, что почти соответствует среднему содержанию суммарной формы меди по данным 2007 г. и существенно превышает фон 2006 г. При этом отчетливо видна приуроченность

повышенных концентраций меди к прибрежным районам и выпускам Северной и Южной САС. Близкое распределение демонстрирует и цинк. В этом сказывается большая роль невского стока. Однако, по нашему мнению, есть еще один мощный фактор самоочищения водной толщи — это донные осадки в условиях уничтожения зоны окисления и усиления миграции на геохимическом барьере «дно-вода».

В любом случае, геохимическая обстановка за 2005–2008 гг. существенно ухудшилась. В 2008 г., когда по данным гидрохимических исследований обстановка в водной толще улучшилась, а также снизилось содержание взвешенных веществ, в донных осадках на большинстве станций был зафиксирован рост концентраций измеряемых поллютантов. Высокие содержания кадмия были установлены в западной части Невской губы. Наиболее вероятным источником кадмия, вероятно, является осаждение его со взвешенным веществом, продуцированным при дноуглублении в 2007 г. и зимой 2008 г. Высокие концентрации кадмия выявлены и вдоль берега Курортного района, вероятно, трассируя путь распространения взвеси, что хорошо совпадает с данными космосъемки. Для меди, тяжелого металла второго класса опасности и геохимически весьма подвижного, отмечен рост концентраций с 2006 г. (среднее содержание Cu — около 90 ppm) к 2007 г. (на целом ряде точек уровень концентраций превзошел уровень 190 ppm), т.е. осадки можно характеризовать как высокозагрязненные. В 2008 г. практически на всех станциях уровень концентраций меди превышал 200 ppm и порой достигал 250 ppm. В то же время, загрязнения по свинцу, мышьяку, хрому в 2008 г. в донных осадках практически отсутствовали. Для нефтепродуктов (НП), начиная с 2005 г., по средним значениям наметился рост концентраций, хотя и неоднозначный, если сравнивать по отдельным циклам мониторинга. Наиболее высокие средние содержания были зафиксированы в июне 2006 г., сразу после начала интенсивных дноуглубительных работ (1,4 мг/г). Были выявлены станции с аномально высокими концентрациями НП, превышающими уровень высокого загрязнения в 15–20 раз. В 2008 г. ситуация с локальными резкими аномалиями практически не проявилась, максимальные содержания не превышали 1,2 мг/кг, но сам фон стал постоянным и практически сохранился с прошлого года. В прилежащей части Финского залива высокие концентрации НП в донных осадках были выявлены вблизи мыса Песчаный, на станциях ФЗ-1 и Ф-40Е (0,76 и 1,05 мг/г, соответственно). Характерно, что рядом находится нефтяной терминал. Однако возрастание концентраций НП почти на порядок по сравнению с 2006 г., скорее, связано с поступлением загрязненной взвеси из Невской губы, нежели с деятельностью терминала. Проведенные в 2007–2008 гг. специальные исследования показали, что в Невской губе было установлено присутствие α-, β- и χ-ГХЦГ, причем распределение их концентраций указывает на вынос их из Невской губы, скорее всего, в адсорбированном виде на взвеси. Стойкие органические соединения также были установлены и в донных осадках. В 2008 г. превышение ПАУ уровня загрязнения было установлено на ст. 6 в Северной Лахте, где осуществлялась свалка грунта из карьеров Морского фасада. Лимит загрязнения донных осадков отдельно по бензопирену в отечественных классификациях не лимитируется. В то же время он является наиболее токсичным и канцерогенным из всех ПАУ, а происхождение его связывается как с деятельностью транспорта, так и со свалками. Именно вскрытие свалок грунта в процессе разработки приостровной акватории Пассажирской Гавани и привело, по

нашему мнению, к появлению рассматриваемых загрязнителей в донных отложениях Невской губы. Отметим, что аналогичные работы в районе строящихся гидротехнических сооружений Усть-Лужского порта не только не привели к загрязнению донных отложений, но, наоборот, обеспечили некоторое снижение концентраций нефтепродуктов и ряда тяжелых металлов. Причина этого парадоксального явления заключается в том, что в данном районе более глубокие слои грунта, которые и были использованы для формирования новых территорий, изначально содержали только фоновые концентрации всех основных загрязнителей. Также низок был уровень содержания этих поллютантов и в воде. Соответственно, слой «отсева» перекрыл современные, слегка загрязненные илы. Таким образом, в этом случае дреджинг сыграл даже очищающую роль (естественно, не учитывая негативный эффект от взвешенных частиц).

Таким образом, мы видим, что постановка работ без учета современных реалий может привести к очень плачевным обстоятельствам, как это случилось в Невской губе, когда в ней одновременно выполнялся отбор грунта по нескольким проектам. Особую опасность он представляет именно в мелководных трансграничных бассейнах. В то же время, накопленный в городе опыт свидетельствует, что при правильной организации работ и использовании комплекса природоохранных мероприятий можно свести к минимуму опасные для природной среды последствия, в том числе и загрязнение водной толщи и донных осадков.

Литература

1. Водные объекты Санкт-Петербурга. Под ред. С.А. Кондратьева и Г.Г. Фрумина. — СПб., 2002. — 348 с.
2. *Голубев Д.А., Погребов В.Б., Шилин М.Б.* Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива по отношению к механическим воздействиям от подводных горно-технических работ. // Инженерные изыскания, 2010, № 9, с. 34–43.
3. *Рыбалко А.Е., Федорова Н.К.* Состояние геологической среды Балтийского моря (геологические опасности, экзогенные процессы) в условиях увеличения антропогенного давления. // VIII Международный экологический форум «День Балтийского моря». Сб. тезисов докладов. — СПб., 2007, с. 108–109.
4. *Усанов Б. П., Викторов С.В, Сухачева Л.Л.* Новый «удар» по Невской губе. // Транспорт Российской Федерации», 2009, № 1, с. 25–41.
5. *Шилин М.Б., Погребов В.Б., Лукьянов С.В., Мамаева М.А., Леднова Ю.А.* Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 25, с. 107–122.
6. *Шилин М.Б., Еремина Т.Р., Мамаева М.А.* Дреджинг наводит мосты. // В кн.: Экологические аспекты дреджинга. — СПб.: РГГМУ, 2013, с. 427–435.
7. *Chusov A.N., Lednova J., Shilin M.* Ecological Assessment of Dredging in the Eastern Gulf of Finland. // Print ISBN: 978-1-4673-1413-8, DOI: 10.1109 / Baltic: 2012.6249169 / ISSN 2150-6027: p. 1–4.

Л.Л. Сухачева

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ АСПЕКТЫ ДРЕДЖИНГА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ПРОЕКТОВ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА — ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

L.L. Sukhacheva

ECOLOGICAL AND OTHER ASPECTS OF DREDGING DURING REALIZATION OF LARGE SCALE ENGINEERING PROJECTS IN THE EASTERN GULF OF FINLAND — SUMMATION OF MULTIYEAR REMOTE SENSING OBSERVATIONS

Обобщены результаты регулярного спутникового мониторинга акватории Невской губы и восточной части Финского залива, проведенного в период реализации крупномасштабного проекта «Морской фасад Санкт-Петербурга», 2005–2008 гг. На основе анализа современных и архивных материалов дистанционного зондирования исследована изменчивость экологического состояния акватории. Рассмотрены аспекты и проблемы, которые способствовали усилению негативного техногенного воздействия дреджинга на экологическое состояние акватории Невской губы и восточной части Финского залива в период реализации проекта «Морской фасад».

Ключевые слова: дреджинг, загрязнение взвешенными веществами, спутниковый мониторинг, антропогенное воздействие, динамика экологического состояния акватории.

In the paper results of regular satellite monitoring of the Neva Bay and the Eastern Gulf of Finland conducted during the period of realization of the large-scale Project — «The Sea Facade of the Saint-Petersburg» (2005–2008) have summarized. Variability of an ecological state of aquatic system has investigated based on the analysis of contemporary and archival remote sensing data. Aspects and problems, which promoted strengthening of negative anthropogenic influence of dredging on an ecological state of the Neva Bay and the Eastern Gulf of Finland during period of realization of the Project, are considered.

Key words: dredging, contamination by suspended matter, satellite monitoring, anthropogenic impact, dynamics of ecological state of aquatic system.

Исследования выполнены на основе анализа материалов регулярного спутникового мониторинга Невской губы и восточной части Финского залива, проведенного в период реализации крупномасштабного проекта «Морской фасад Санкт-Петербурга», 2005—2008 гг., в рамках которого осуществлялся большой объем дреджинговых работ. При этом анализировались также спутниковые изображения за предшествующие и последующие годы, за 2004 и 2009—2012 гг. Для определения масштабов и интенсивности техногенного загрязнения и оценки динамики экологического состояния акватории был проведен сравнительный анализ современных и архивных материалов дистанционного зондирования (МДЗ), имеющихся в НИИКАМ. В целом, данные аэрокосмических

наблюдений исследуемой акватории охватывают период с конца 70-х гг. прошлого века по настоящее время. Дешифрирование и тематическая интерпретация спутниковых изображений проводилась на основе использования разработанных ранее методик качественной и количественной оценки степени загрязнения акватории взвешенными веществами (ВВ) [1, 3] и регионально/локально ориентированных баз знаний.

Регистрируемые на спутниковых изображениях вариации яркости излучения моря могут быть обусловлены следующими факторами: отражением от дна (в мелководных районах с относительно прозрачными водами), развитием фитопланктона и донной растительности, неоднородностями водной поверхности (поверхностными течениями, нефтяными разливами и другими поверхностно активными веществами), взвешенными органическими и минеральными веществами, а также атмосферными неоднородностями. Для получения корректных результатов при дешифрировании и тематической интерпретации спутниковых изображений моря необходимо анализировать все факторы, которые могли повлиять на формирование сигнала на уровне ИСЗ.

Регулярный экологический спутниковый мониторинг Невской губы и восточной части Финского залива проводился на основе использования данных Terra/MODIS, Aqua/MODIS и MERIS/ENVISAT [2]. Для детальных исследований использовались данные космической системы LANDSAT, а также, так называемые, «квиклуки» снимков сверхвысокого разрешения: Quick Bird, IKONOS, World View (сайт компании Совзонд — www.sovzond.ru).

Данные современного спутникового мониторинга (2005–2012 гг.) и анализ динамики экологического состояния акватории с учетом МДЗ за предшествующие десятилетия, свидетельствуют о том, что масштабы и интенсивность антропогенного загрязнения акватории взвешенными осадками в период осуществления проекта «Морской фасад» были значительными. Техногенное воздействие на исследуемую акваторию превосходило отмечавшееся здесь ранее в период проведения в Невской губе дреджинговых работ, связанных с намывом городских территорий (см. рис. 1) в 70-е и 80-е гг. прошлого века [1, 4–10].

Анализ динамики загрязнения акватории Невской губы и восточной части Финского залива взвешенными веществами за 36-летний временной интервал (период с 1976 по 2012 г.), проведенный на основе использования МДЗ, показал, что в экологическом состоянии акватории может быть выделено четыре периода: I — с середины 70-х по начало 90-х гг; II — с начала 90-х гг. по 2004 г.; III — с 2005 по 2008 г.; IV — с 2009 г. по настоящее время.

Хотя зоны с повышенными значениями концентраций взвешенных веществ (по сравнению с фоновыми значениями) могут быть обусловлены и природными факторами, регистрируемые на космических снимках (КС) высокие и очень высокие значения концентраций взвеси, в рассматриваемой ситуации, связаны, главным образом с техногенным воздействием. Известно, что высокие значения концентраций взвешенных осадков, возникающие при перемещении больших объемов грунта, загрязняют водную и геологическую среду, ухудшают условия освещенности, оказывают негативное влияние на биоценозы, ухудшают экологическое состояние акватории.

Особую опасность для аквальных и прибрежных экосистем представляют интенсивные, длительные воздействия, охватывающие значительные пространственные

масштабы, загрязнения взвешенными веществами. Именно такая ситуация сложилась в акватории Невской губы и восточной части Финского залива при реализации проекта «Морской фасад» в течение 2006–2007 гг. Эти годы отличались наиболее интенсивным воздействием дреджинговых работ на акваторию [4–6].

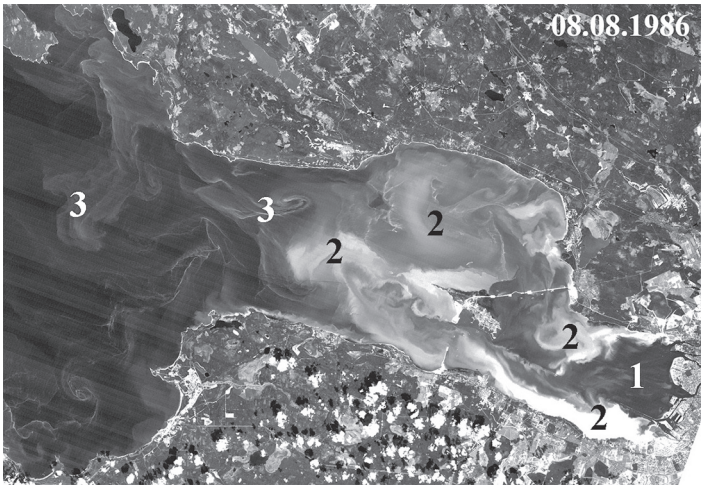

Рис. 1. КС LANDSAT/TM, 08.08.1986. В Невской губе ведутся работы по намыву городских территорий и по строительству комплекса защитных сооружении Санкт-Петербурга от наводнений. В процессе возведения дамбы в период 1985–1986 гг. были фактически перекрыты Северные ворота губы, вследствие чего изменился режим течений, значительно увеличился расход воды через Южные ворота. Условные обозначения: *1* — речные воды (фоновые); *2* — воды в разной степени загрязненные взвесью; *3* — сине-зеленые водоросли

Основным источником интенсивного загрязнения акватории взвесью являлись дреджинговые работы по разработке Петровского фарватера и Подходного канала с отвалом изымаемых тонкодисперсных алевроглинистых осадков в Невскую губу. Объем дноуглубительных работ составил: в 2005 г. – 1 230 000 м^3, в 2006 г. — 12 150 000 м^3, в 2007 г. — более 8 000 000 м^3, в 2008 г. было принято решение увеличить глубину подходного канала с 8 до 11 м и, соответственно, добавить дополнительный объем дреджинга.

По данным спутниковых наблюдений начиная с июля 2006 г. по сентябрь 2008 г. на значительной части акватории Невской губы и восточной части Финского залива постоянно отмечалась высокая степень загрязнения вод взвешенными веществами — «грязные» и «очень грязные» воды (в соответствии с градациями, используемыми для качественной оценки загрязнения поверхностных вод ВВ [1, 3]). В период наиболее интенсивного техногенного воздействия дреджинга на акваторию значения концентраций взвеси часто превосходили 300 мг/л (при используемом в РФ значении ПДК для рыбохозяйственных водоемов — 10 мг/л), зоны с высокой концентрацией взвешенных осадков охватывали значительную часть акватории, распространяясь в залив на расстояния до 200 км. По данным ФГУНПП «Севморгео», в октябре 2006 г. показатели мутности придонных вод в Невской губе достигали 1000 ед. FTU [11].

Из анализа литературных данных и интернет ресурсов следует, что к настоящему времени воздействие дреджинга на водные экосистемы недостаточно изучено. Имеются лишь отдельные локальные исследования, отличающиеся как природными условиями, так и характером, и масштабами дреджинговых работ. Например, в обзоре [12] приводятся данные о негативном воздействии дреджинга на биоту, в том числе и на рыбные сообщества. Результаты лабораторных исследований показали, что молодь лососевых (Coho salmon) активно избегает значения мутности более 70 ед. FTU [13].

В 2006–2007 гг. вдоль всего побережья Курортного района Санкт-Петербурга постоянно регистрировались высокие значения концентраций взвешенных веществ. Под воздействием локальных апвеллингов возникали гидрологические барьеры. При этом загрязненные взвешенными осадками воды, поступавшие из Невской губы, «удерживались» и тонкодисперсные взвешенные осадки частично оседали в вершине Финского залива [4–6]. По данным судовых натурных измерений, проведенных РГГМУ 9–10 августа 2006 г. в районе Сестрорецка (на значительном удалении от районов дреджинга и отвала грунта), концентрации общей взвеси достигали 90 мг/л.

На основе анализа спутниковых данных сенсора MODIS за 07.08.2006–09.08.2007 можно заключить, что у северного побережья Невской губы в этот период концентрации взвеси составляли более 300 мг/л; по данным [14] в 2007 г. на выходе размещенного здесь грунто-разбрасывающего понтона землесоса Slidrecht концентрация взвеси составила 1332 мг/л. По наблюдениям ВСЕГЕИ и ФГУНПП «Севморгео», на значительных площадях Невской губы и восточной части Финского залива отмечалось заиление дна, изменение состава грунтов и режима донных осадков [11]. Примеры регистрации загрязнения акватории взвесью по данным сенсора MODIS представлены на рис. 2,3. Рассматриваемые ситуации отличаются интенсивностью проведения дреджинга, «способом» отвала грунта, наличием одновременно двух источников загрязнения, см. КС за 30.09.2007, гидрометеорологическими условиями. Отметим, что специализированная обработка спутниковых изображений, в большинстве случаев, позволяет идентифицировать разные источники поступления взвеси. В сентябре 2007 г. кроме дноуглубительных работ, осуществлялись работы по завершению строительства комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений.

Анализ спутниковых изображений за 2009–2012 гг. (период прекращения интенсивных дноуглубительных работ) показывает, что в акватории Невской губы и восточной части Финского залива часто регистрируются существенные загрязнения поверхностных вод взвешенными веществами, в 2–4 раза превышающие фоновые значения и охватывающие значительную по площади часть акватории, см. рис. 2 (КС за 18.07.2009). В данном случае проявляется эффект вторичного загрязнения водной среды взвесью вследствие ветроволнового взмучивания «подвижного» илистого слоя донных осадков, образовавшегося в период интенсивного дреджинга — 2006–2007 гг.

Результаты детального тематического дешифрирования целого ряда спутниковых изображений 2006 г. свидетельствуют о том, что интенсивное дноуглубление часто сопровождалось свалкой изымаемого грунта не только в отведенные для этих целей подводные отвалы (старые карьеры Невской губы), но и в других частях акватории (см., например, рис. 4 и рис. 1 в работе [5]).

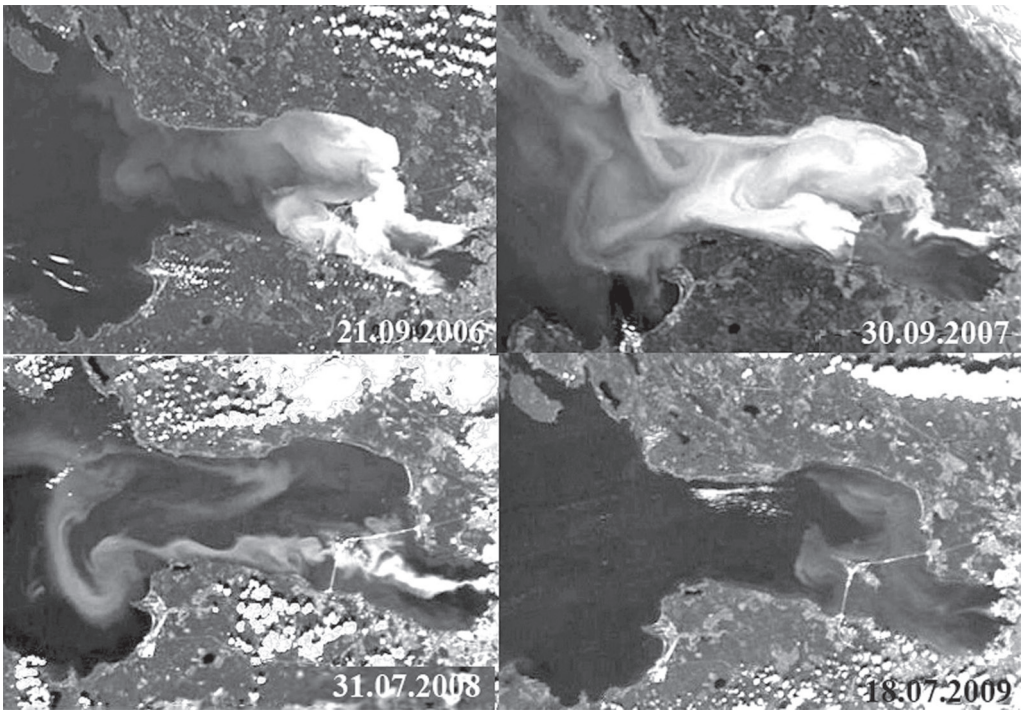

Рис. 2. Примеры регистрации сенсором MODIS загрязнений акватории взвесью. Ситуации отличаются интенсивностью проводимых дноуглубительных работ, «способом» отвала грунта, гидрометеорологическими условиями. В 2007 г. гидротехнические работы проводились также в районе южного створа КЗС; отвал грунта от дреджинга осуществлялся вдоль северного побережья Невской губы. В 2009 г. дреджинг не проводился, зарегистрированное загрязнение водной среды взвесью обусловлено ветроволновым взмучиванием образовавшегося илистого слоя неконсолидированных донных осадков

Рис. 3. Слева — КС MODIS за 24.11.2007. Начало процесса льдообразования. Дноуглубительные работы не проводятся. Повышенные значения концентраций взвеси отмечаются на значительной части акватории. Справа — КС MODIS за 02.01.2008. Даже после прекращения гидротехнических работ тонкодисперсная пелитовая составляющая взвеси еще долгое время (до 1,5–2 месяцев) находятся во взвешенном состоянии

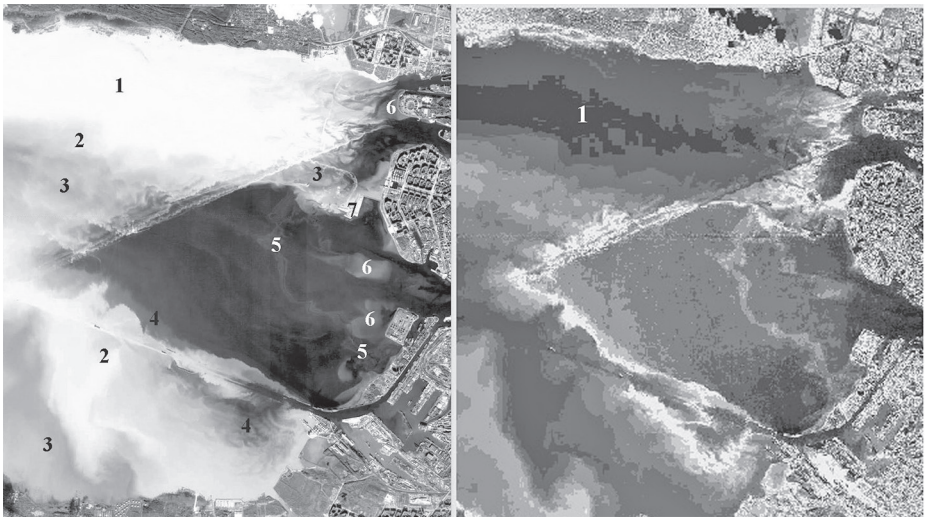

Рис. 4. Слева — изображение восточной части Невской губы по данным КС IKONOS за 12.10.2006: *1* — очень высокие значения концентраций взвешенных осадков; *2* — высокие значения концентраций; *3* — средние; *4* — низкие значения; *5* — нефтяные загрязнения; *6* — отмели и мели; *7* — строящийся причал. Справа — значения яркостей в третьем канале, в зоне «насыщения» выделяется несколько градаций яркости, *1* — максимальная яркость, соответствующая району отвала грунта

Исходя из этого, можно предположить, что в Невской губе могли произойти существенные непредвиденные изменения донного рельефа.

Рассмотрим отдельные аспекты и проблемы, которые способствовали усилению негативного техногенного воздействия дреджинга на экологическое состояние акватории Невской губы и восточной части Финского залива в период реализации проекта «Морской фасад»:

- Природные факторы, влияющие на экологические последствия гидротехнических работ. Невская губа представляет собой мелководный, практически замкнутый, водоем лагунного типа с затрудненным водообменном. При дноуглублении перемещались, в основном, тонкодисперсные ледниково-озерные отложения. Реализации проекта «Морской фасад» совпала с периодом низкого стояния уровня моря. При формировании в восточной части Финского залива сезонной стратификации водных масс здесь регистрируются локальные апвеллинги, способствующие «удержанию» взвеси в вершине залива.
- Антропогенные факторы. Проявление в отдельные периоды наблюдений кумулятивного эффекта от воздействия на акваторию одновременно нескольких техногенных источников (работы по реконструкции Морского канала, завершению строительства комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений и др.). Проведение дреджинга сразу несколькими мощными землесосами. Осуществление отвалов всего объема изъятого грунта непосредственно в Невскую губу, по данным спутникового мониторинга неоднократно отмечались случаи бесконтрольного проведения отвалов грунта. Значительная дальность распространения,

низкая скорость оседания (см. рис. 2, 3) и высокая сорбционная способность (адсорбция и перенос гидрохимических и др. видов загрязнений из водной среды) перемещаемых тонкодисперсных взвешенных осадков.

- Нормативно-правовые и законодательные аспекты. Отсутствие и несовершенство законодательных документов — «Закона о береговых зонах», «Водного кодекса РФ» и ряда других. Существование возможности формального исполнения, или «обхода» действующих, зачастую устаревших, нормативных документов [5–8]. Например, в докладе В.М. Зайцева [14] на семинаре по дреджингу «Экологическая безопасность дреджинга в современном мире» (2009 г.) отмечалось, что разрешительные процедуры для проведения дноуглубительных работ и дампинга грунта в отвалы акватории Финского залива в пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской области осуществляются на основе «Временного разрешения» 1996 г. Указанное временное разрешение утверждено начальником Балтийской специнспекции и не имеет статуса документа, узаконенного федеральными органами.
- Экологический мониторинг/аудит проводился ненадлежащим образом. С нарушением существующих международных норм и правил. Результаты мониторинга не только регулярно не освещались в средствах массовой информации, а вообще были отнесены к «коммерческой тайне». Выводы о незначительном воздействии, проводимых гидротехнических работ, на экологическое состояние акватории не соответствуют действительности. Тем более что проводился экологический аудит только в пределах лицензионного участка (восточная часть Невской губы), а шлейфы взвешенных осадков распространялись в залив на расстояния до 200 км.
- Финансово-экономические аспекты. Коммерческие интересы инвесторов направлены, прежде всего, на получение максимальной прибыли, следовательно, расходы на использование щадящих технологий, а также расходы на защиту и восстановление окружающей среды минимизируются.
- Социально-политические аспекты. Замалчивание и/или сокрытие инвесторами сложившейся неблагополучной ситуации и принятие на разных уровнях административными и контролирующими органами удобного тезиса «О незначительном воздействии проекта «Морской фасад» на экологию Невской губы и восточной части Финского залива». Такие выводы декларировались, в течение всего периода реализации проекта, специалистами фирмы «КОНТО», выигравшей в 2005 г. тендер на проведение сопровождающего экологического мониторинга по всем четырем составляющим проекта «Морской фасад Санкт-Петербурга», в том числе по дноуглублению. Данные и результаты этого мониторинга широкой общественности недоступны.

Заключение

В современных условиях решение вопросов, связанных с экологическими проблемами и регулированием хозяйственной деятельности в Невской губе и восточной части Финского залива особенно актуальны, поскольку в ближайшем будущем в

акватории ожидается осуществление новых крупных проектов, связанных с масштабными гидротехническими работами и, соответственно, со значительным техногенным воздействием на акваторию. Уже стартовало строительство портового комплекса в районе Бронки (дреджинг и намыв территорий). Активно продвигается проект «Новый берег» (намыв территорий на участке Лисий Нос — Сестрорецк) и др. В связи с этим необходимо принять действенные меры по минимизации негативного техногенного воздействия на экосистему и предотвращению дальнейшего ухудшения экологического состояния акватории. При этом необходимо учесть негативные аспекты проведения дреджинга и отвала грунта в акваторию Невской губы, проявившиеся при реализации проекта «Морской фасад Санкт-Петербурга». Кроме того, необходимо изменить сложившуюся практику монопольной хозяйственной деятельности в акватории при реализации крупных инженерных проектов, когда не учитываются ни экологические последствия интенсивного техногенного воздействия на окружающую природную среду ни интересы других водопользователей (рыболовство, рыбоводство, курортный бизнес, яхтенный спорт, рекреация жителей Санкт-Петербурга и др.).

Литература

1. *Сухачева Л.Л.* Исследование разномасштабной пространственно-временной изменчивости полей взвеси в восточной части Финского залива по данным многолетних аэрокосмических наблюдений. // Исследование Земли из космоса, 1996, № 5, с. 85–93.
2. [http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/ и http://miravi.eo.esa.int/en/].
3. *Сухачева Л.Л., Кильдюшевский Е.И.* Дистанционное зондирование природных ресурсов побережий и акваторий. // В книге: Методы дистанционного зондирования Земли при решении природоресурсных задач. Справочник. Главные редакторы А.Ф. Морозов, А.В. Перцов. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004, с. 87–100.
4. *Сухачева Л.Л.* Анализ воздействия природных и антропогенных факторов на динамику загрязнения восточной части Финского залива взвешенными веществами по данным многолетних аэрокосмических наблюдений. // Сб. тезисов VIII Межд. Экологич. Форума «День Балтийского моря». СПб., 21–23 марта 2007, с. 120–122.
5. *Сухачева Л.Л.* Актуальность проведения спутникового экологического мониторинга Невской губы и восточной части Финского залива в условиях возрастания антропогенной нагрузки на акваторию. // Сборник материалов I научной конференции СПбГУ, посвященной «Году Финского залива — 2014», 16 февраля 2012 г. — СПб, 2012, с. 247–252.
6. *Сухачева Л.Л.* Спутниковый мониторинг в оценке техногенных воздействий крупных проектов XXI века на экосистему Невской губы и восточной части Финского залива. // Сборник материалов XXIII Международного экологического форума «День Балтийского моря». СПб., 21–23 марта, 2012, с. 98–101.
7. *Шилин М.Б.* Экологическая безопасность дреджинга в современном мире — взгляд из Санкт-Петербурга. // Гидротехника, 2009, № 4 (17), с. 47–49.
8. *Шилин М.Б., Голубев Д.А.* Экологическая безопасность дреджинга в современном мире. // Гидротехническое строительство, 2010, № 3 (17), с. 52–55.
9. *Шилин М.Б., Погребов В.Б.* Экологическая чувствительность береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу. // Основные концепции берегопользования. Т. 3. — СПб.: РГГМУ, 2011, с. 168–189.
10. *Шилин М.Б., Погребов В.Б., Лукьянов С.В., Мамаева М.А., Леднева Ю.А.* Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 25, с. 107–122.
11. *Rybalko A.E., Fedorova N.K., Maximov A.A.* Influence of hydraulic engineering work on forming of geochemical structure of bottom sediment (the Eastern Gulf of Finland in 2006–2008). // Geology of seas and oceans:

Reports collection of XVIII International Scientific Conference for Marine Geology, vol. IV. — Moscow. GEOS, 2009, p.147–149.

12. *Bret C. Harvey, Tomas E. Lisle.* Effects of Suction Dredging on Streams: a Review and an Evaluation Strategy. // Fisheries , august 1998, vol.23, № 8, p. 8–17.
13. *Bisson P.A., Bilby R.E.* Avoidance of suspended sediment by juvenile coho salmon. N. Am. J. Fish. Manage. 4:371–374, 1982.
14. *Zajtsev V.N., Lukyanov S.V., Shilin M.B.* Monitoring of Environmental conditions in six regions of modern subwater rejected excavation in the eastern part of the Gulf of Finland. // Abstracts and presentations collection of Central Dredging Association (CEDA) — RSHU international seminar «Eco-Friendly Dredging in the Modern World». 13–14 October 2009, Hotel Moscow, St. Petersburg, Russia [http://www.rshu.ru/university/conf/].

В.Б. Погребов, О.А. Кийко, А.А. Филиппов

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И МОНИТОРИНГ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ДРЕДЖИНГА В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

V.B. Pogrebov, O.A. Kiyko, A.A. Filippov

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT AND MONITORING OF BIOLOGICAL CONSEQUENCES OF DREDGING IN THE GULF OF FINLAND, THE BALTIC SEA

В статье рассмотрены результаты оценки воздействия на морские биологические сообщества Финского залива добычи железомарганцевых конкреций на его акватории. Проведено сравнение полученных заключений с итогами мониторинговых наблюдений последствий дреджинга в самом Финском заливе и в Лужской губе, где проводится дноуглубление и намыв территорий в связи со строительством морского торгового порта. Обсуждается возможность применения для оценки нарушений донных сообществ индекса, характеризующего отклонение состояния биоты от нормы. Предлагается использовать индекс для построения наглядных карт текущего состояния донного населения.

Ключевые слова: Балтийское море, Финский залив, морские биологические сообщества, воздействие дреджинга.

Results of impact assessment on biological communities by extraction of procurement ferro-manganese nodules in the water area of Finland Gulf are considered in this article. The comparison of received conclusions with results of monitoring observations after dredging in the Gulf of Finland and in the Luga Bay, where dredging and land reclamation are made in relation with construction of sea commercial harbor are led. The possibility of the Index of Biota State for assessment impact on benthic communities, which characterizes deviation of biota from ecological norm are discussed.

Key words: the Baltic Sea, Gulf of Finland, marine communities, impact of dredging.

Словосочетание «дноуглубление и дампинг грунта» в настоящее время прочно закрепилось в экологической литературе. Напомним, что под дампингом понимается захоронение отходов в море (http://dic.academic.ru/). Термин же «дреджинг» только начинает распространяться в отечественном научном лексиконе и поэтому требует пояснения. В русскоязычных словарях этот термин пока отсутствует, а переводы с английского (http://en.wikipedia.org/) толкуют дреджинг как деятельность по экскавации грунта и другим грунтовым операциям, которые частично выполняются под водой с целью подъема донных осадков наверх и последующего их размещения в различных местах назначения. Часто этот термин в большей степени соответствует положению дел, чем «дноуглубление». Так, например, один из недавних проектов, выполнявшийся на акватории Финского залива с целью добычи железомарганцевых конкреций (ЖМК) [14], в полной мере соответствовал понятию «дреджинг», поскольку не включал в себя намеренное дноуглубление.

Распространению термина в России способствовал международный семинар «Экологическая безопасность дреджинга в современном мире», организованный в 2009 г. Центральной дреджинговой ассоциацией (Central Dredging Association, или CEDA, Нидерланды), Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ) и Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом (СПбГПУ) при взаимодействии с Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Администрации Санкт-Петербурга (http://www.cedaconferences.org/st-petersburg2009) [18, 19].

Экологические воздействия дреджинга, независимо от используемой терминологии, для морской экосистемы сводятся к изъятию донных осадков со дна; их сбросу на дно; загрязнению водной толщи взвесью; загрязнению воды и донных осадков содержащимися во взвеси веществами. При планировании деятельности, связанной с подъемом грунта на поверхность и его захоронением на дне, эти группы воздействий для различных компонентов береговых и прибрежных экосистем следует рассматривать отдельно.

В Балтийском море в экологическом сопровождении ряда дреджинговых проектов, связанных с изъятием, перемещением и складированием больших объемов грунта («дреджингового материала») в последние годы, наряду с другими организациями, участвует экологическое агентство «Экопроект» (www.ecopro.spb.ru/). Задача настоящей публикации — представить результаты оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), связанные с дреджингом и относящиеся к биологическому разделу исследований, и сопоставить оценки, сделанные до начала дреджинговых операций, с итогами биологического мониторинга их последствий.

Материалом для работы послужили данные, полученные на разных стадиях реализации проекта по добыче железомарганцевых конкреций на акватории Финского залива, а также в ходе сооружения и функционирования морского торгового порта Усть-Луга [14, 16, 17, 11, 4, 5, 24, 25, 20]. Работы ЗАО «Экопроект» на Финском заливе, разумеется, не являются пионерскими. В частности, большой вклад в обсуждаемый вопрос внесли специалисты ГОСНИОРХ и РГГМУ [7, 18, 1, 2, 3, 21].

Оценивание, выполненное в нашей работе, концептуально базировалась на процедуре «адаптивной оценки и управления», предложенной К. Холлингом [23]. Метод использован в России в ходе ОВОС последствий интенсификации судоходства по трассе Северного морского пути (программа INSROP) [27] и на Черном море [10]. Подробное изложение подхода на русском языке представлено в доступных публикациях [12, 13]. При использовании метода, оценка возможных воздействий на окружающую среду включает выбор важнейших экосистемных компонентов (ВЭК), которые могут быть затронуты планируемой деятельностью. Собственно оценка осуществляется в категориях пространства, времени и интенсивности воздействия, а заключение о его «существенности» или «несущественности» проводится по таблице. Градации используемых категорий и заключений представляются несколько упрощенными. Однако они лишены двусмысленности и в случае необходимости могут быть разбиты на дополнительные классы.

Изложение материала в настоящей статье облегчается сводкой по воздействию дреджингового материала на основные компоненты экосистемы Финского залива,

опубликованной в серии «Основные концепции современного берегопользования» [20]. Перечень использованных биологических показателей и ход анализа понятен из таблицы (см. ниже).

Обсуждая основные итоги оценки воздействия дреджинговых операций на биологические компоненты экосистемы Финского залива, напомним, что частое и значительное повышение мутности воды во время штормов, вообще говоря, характерно для таких мелководных акваторий как Финский залив. В частности, по результатам инструментальных наблюдений, выполненных в Лужской губе, ее акватория и до начала проведения там гидротехнических работ характеризовалась постоянно высокой концентрацией взвеси. По результатам исследований, выполненных до глубины 5 м, содержание взвешенных веществ в верхнем горизонте воды варьировало в пределах 3–35 мг $л^{-1}$, составляя в среднем 17,5 мг $л^{-1}$. У дна содержание взвешенных веществ было равно 9–169 мг $л^{-1}$ при средней концентрации, равной 77,4 мг $л^{-1}$. Указанные величины находятся в пределах фоновых уровней (10–100 мг $л^{-1}$), отмечаемых для мелководных районов внутренних морей.

Воздействие дреджинговых операций на биологические компоненты морской экосистемы Финского залива Балтийского моря

Компонент экосистемы	Характер воздействия			
	Масштаб	Длительность	Степень	Заключение
Фитопланктон	Локальное	Кратковременное	Незначительное	Несущественное
Зоопланктон	Локальное	Кратковременное	Незначительное	Несущественное
Водоросли макрофиты	Точечное	Средневременное	Значительное	Существенное отрицательное
Высшие водные растения	Точечное	Средневременное	Умеренное	Несущественное
Бентос	Локальное	Средневременное	Значительное	Существенное отрицательное
Рыбы	Локальное	Средневременное	Умеренное	Несущественное
Птицы	Локальное	Средневременное	Умеренное	Несущественное
Тюлени	Локальное	Средневременное	Умеренное	Несущественное
ООПТ	Локальное	Средневременное	Незначительное	Несущественное

При хроническом воздействии взвеси, негативные реакции у гидробионтов могут возникать, начиная с содержания ее в воде в 20–30 мг $л^{-1}$. Однако эти первичные реакции быстро компенсируются за счет таких свойств гидробионтов, как короткий жизненный цикл, высокая скорость размножения, вертикальные миграции, способность к горизонтальному перемещению с водными массами и им подобным, т.е. благодаря особенностям, определяющим их высокую адаптацию к возникающим стрессовым ситуациям.

Основной рыбохозяйственый вывод по последствиям воздействия мутности, возникающей вследствие дреджинга, состоит в том, что при соблюдении технологии работ и запретов на их проведение в нерестовый период воздействие непосредственно на ихтиофауну незначительно. При этом ущерб рыбным запасам, который является

следствием взмучивания воды и дампинга грунта, относится к ***опосредованному***. Он возникает вследствие уничтожения части площадей и субстратов нерестилищ, а также временной потери кормовых угодий рыб.

Особого пояснения из оценок, приведенных в таблице, возможно, требует заключение о ***локальном*** воздействии в графе «масштаб» для большинства биологических объектов. Площадь дреджинговых операций, намеченных для добычи железомарганцевых конкреций, по наибольшему линейному размеру превышала 100 км. Поэтому по строго формальным признакам возможные нарушения могли бы быть классифицированы как ***региональные***. Однако при их оценивании было принято во внимание то, что в ходе добычи ЖМК непосредственное воздействие будет оказываться ***последовательно*** на отдельные участки рассматриваемой акватории. Сама же добыча будет вестись сравнительно продолжительное время (работы планировались на срок более десяти лет в течение трех месяцев в году). Таким образом, область воздействия фактически должна была постепенно смещаться по мере проведения работ от участка к участку, а во времени должна была иметь прерывистое распределение.

Заключение о ***средневременном*** характере воздействия определялось тем, что ни в одном из проанализированных литературных источников не удалось найти сведений об изменении какого-либо компонента окружающей среды под воздействием замутнения воды и дампинга на сроки большие, чем несколько лет. При этом данные об отдаленных экологических последствиях перемещения грунта в акватории, которые наблюдались бы для биологических объектов на популяционном уровне (а именно: они считаются прямым подтверждением существенности антропогенного воздействия) также отсутствуют. Кроме того, межгодовая вариабельность большинства биологических характеристик морских экосистем настолько значительна, что выявить даже средневременные антропогенные тренды на фоновом уровне в большинстве случаев невозможно [12, 15].

Лишь для двух групп объектов, из числа рассмотренных, степень воздействия оценена как ***значительная***. Это водоросли макрофиты и донные беспозвоночные. Из этих групп наибольший ущерб от добычи ЖМК могут понести донные животные, для которых итоговое заключение свидетельствует о значительности воздействия. Однако реальные размеры потерь, как показывает более детальный анализ, хотя и ***существенны***, по сути, невелики в абсолютном выражении. Это связано со следующим.

Качественный и количественный состав бентосных организмов Финского залива, по оценке всех специалистов гидробиологов, чрезвычайно беден. Всего в восточной части Финского залива насчитывается около 40 видов и форм донных беспозвоночных, а биомасса бентоса лишь на редких участках превышает 100 г м$^{-2}$ (обычно она на 1–2 порядка величины ниже). В пределах полей ЖМК видовой и количественный состав донных беспозвоночных крайне обеднен. Здесь отмечено наличие двух видов *Pontoporeia* и, в единичных случаях, *Oligochaeta sp*. Суммарная биомасса бентоса не превышает 23 г м$^{-2}$.

Группы организмов более высоких трофических уровней используют бентос сравнительно слабо. В частности, известно следующее. Среди рыб основным промысловым видом в Финском заливе, составляющим в последние годы 61–66 % общей добычи, является планктоноядная салака [6]. А три вида планктоноядных рыб — салака, килька и корюшка дают 80 % общего улова. Учитывая, что названы лишь виды, лидирующие

в промысле, а чисто бентосоядные рыбы в Финском заливе вообще немногочисленны, планктон следует признать энергетически гораздо более важным объектом питания рыб, чем бентос. Иными словами, возможное снижение обилия донных организмов на ряде участков Финского залива вследствие добычи ЖМК существенного ущерба ихтиофауне не нанесет.

Для некоторых видов птиц бентосные организмы составляют заметную долю рациона. В частности, литоральные виды донных беспозвоночных используются для питания куликами, а со дна (в основном, до глубины 20 м) достают пищу нырковые утки. Однако Ленинградская область исключительно богата водными ресурсами и, в случае заметного снижения обилия донных организмов на ряде участков Финского залива, птицы, питающиеся донными беспозвоночными, смогут найти себе пищу на близлежащих водоемах. Обитающие в российской части залива тюлени фактически исключительно питаются рыбой (преимущественно колюшкой).

В отношении загрязнения воды и донных осадков содержащимися во взвеси веществами сообщим следующее. Донные беспозвоночные в районах планируемой добычи ЖМК уже обитают в условиях высокого природного загрязнения среды, по крайней мере, естественного загрязнения иловых и придонных вод тяжелыми металлами. По итогам исследований, проведенных в районах предполагаемой добычи до начала работ, средние содержания отдельных металлов в иловых водах составляют: меди — 6,3 ПДК, свинца — 3,6 ПДК, цинка — 1,9 ПДК. Максимальные концентрации металлов превышают ПДК по свинцу в 78 раз, по меди в 28 раз, по цинку в 24 раза, по кадмию в 3.8 раза. Средние содержания отдельных металлов в придонной воде в зонах образования конкреций равны: меди — 2,8 ПДК, свинца — 1,4 ПДК, цинка — 1,3 ПДК. Максимальные концентрации металлов превышают здесь ПДК по свинцу в 6,1 раза, по меди — в 5,4 раза, по цинку — в 2,1 раза. Концентрации марганца и железа в придонных и иловых водах превышают ПДК более чем в 200 раз. Более широкомасштабного, существенного и стабильного повышения содержания металлов в придонной воде вследствие добычи ЖМК, по сравнению с уже существующим загрязнением, не ожидалось. Соответственно не ожидалось и хронического химического отравления бентоса.

Тем не менее, наиболее очевидные эффекты дреджинговых операций (снижение разнообразия и обилия) ожидались именно в бентосе Финского залива. Экологический мониторинг, проведенный параллельно добыче ЖМК на карьерах, расположенных в Выборгском заливе, к северу от острова Мощный и близ устья Лужской губы в полной мере подтвердил заключения ОВОС.

В ходе четырех циклов полевых наблюдений, выполненных в июне, августе, октябре и декабре 2005–2006 гг. [16, 17], было показано, что видовой состав, величины численности и биомассы фито- и зоопланктона в границах полигонов добычи ЖМК и за их пределами практически не различались. Состав доминантного комплекса планктонных организмов был обычен для восточной части Финского залива. В фитопланктоне преобладали сине-зеленые и зеленые водоросли. В зоопланктоне основную роль играли веслоногие рачки и их науплиальные и копеподитные стадии.

Состояние пелагических сообществ в пятне мутности, где исследовались структурные характеристики фитопланктона и зоопланктона, практически не отличалось от такового на фоновых станциях. Однако в период работы земснаряда отмечалось

привнесение в верхний горизонт в небольших количествах придонных видов диатомовых. Последние, при неблагоприятном для них режиме температуры и солености, исчезали из планктона в течение первых часов после прекращения добычи. Динамика биомассы доминантных видов в течение нескольких часов после окончания работы земснаряда имела разнонаправленный характер. На участках, расположенных близ района добычи ЖМК, неизменно наблюдалась повышенная концентрация фитопланктона по сравнению с фоновыми участками.

В зоопланктоне массовыми формами были характерные для Балтийского моря ветвистоусые ракообразные *Podon polyphemoides* и *Bosmina coregoni* и веслоногие ракообразные *Eurytemora affinis*. Существенных отклонений структуры зоопланктона от таковой в близлежащих районах Финского залива вне зоны добычи ЖМК не отмечено.

Видовой состав зообентоса также был типичным для Финского залива. Наиболее характерными в донной фауне были малощетинковые и многощетинковые черви и бокоплавы. Структура зообентоса в границах полигона и за его пределами существенно различалась. В пределах полигона в летний и осенне-зимний период видовое разнообразие, численность и биомасса донных беспозвоночных были в несколько раз ниже, чем на фоновых станциях. На полигоне из состава зообентоса практически полностью выпадали равноногие раки, доминировавшие на фоновых станциях. Наблюдалось также существенное снижение обилия малощетинковых и многощетинковых червей, моллюсков и личинок хирономид.

Локальный экологический мониторинг в Лужской губе [24, 4, 5] ведется с 2006 г. по настоящее время и имеет целью определение изменений основных характеристик экосистемы Лужской губы под воздействием работ, связанных с дноуглублением и намывом новых территорий. Установлено, что наибольшее воздействие на абиотическую среду и биологические сообщества Лужской губы оказывается в процессе физического изъятия донных отложений, которое сопровождаемого значительным увеличением содержания в воде взвешенных веществ, эвтрофикацией водных масс, а также изменением гранулометрического состава донных отложений.

Отклик фитопланктонных комплексов на дноуглубительные работы проявился в массовом развитии видов-индикаторов органического загрязнения и эвтрофных условий. Бентосные сообщества отреагировали на изъятие грунта и увеличение глубины в местах работ перестройкой структуры и исчезновением ряда видов ракообразных и моллюсков, встречавшихся здесь ранее. В донных сообществах начали преобладать эврибионтные формы группы беспозвоночных с широкой экологической валентностью: олигохеты и хирономиды. В ряде случаев отмечено полное исчезновение бентоса.

Потребность в количественной оценке изменений в бентосе вследствие антропогенного воздействия побудила нас некоторое время назад предложить использование индекса состояния биоты (ИСБ) [12, 13]. ИСБ представляет собой частное от деления фактического показателя состояния бентоса (разнообразия, биомассы, доли одной из групп в суммарном обилии) на значение этого же показателя в норме. Сравнение расчетного индекса с табличным позволяет перейти к характеристике фактического состояния от «нормы» ($I > 0,9$) до «катастрофического» ($I < 0,3$). По результатам расчета ИСБ для мониторинговых станций могут быть построены карты, на которых будут оконтурены участки акватории, различающиеся по степени отклонения их состояния

от региональной экологической нормы (по каждой из опробованных характеристик отдельно!). Анализ таких карт и их сопоставление во временном аспекте дают наглядную картину не только ***текущего*** состояния среды по интегральным биологическим показателям, но и их ***многолетней*** динамики.

Экологический мониторинг, выполненный в ходе добычи конкреций, подтвердил сделанные заключения. Расчеты, основанные на выполненных наблюдениях, показали, что бентосные станции, располагавшиеся в зоне добычи, по числу обнаруженных видов и суммарной биомассе донных беспозвоночных соответствовали категориям «очень сильные нарушения», «сильные нарушения» и «нарушения средней силы» [9]. Все контрольные станции, несмотря на природную вариабельность показателей, соответствовали норме. Ряд мониторинговых станций в Лужской губе на протяжении нескольких съемок соответствовал категории «катастрофических» нарушений.

Сходные результаты были получены при оценке состояния бентоса в Невской губе, где проводился намыв территорий, связанный со строительством морского пассажирского терминала в западной части Васильевского о-ва. ИСБ по видовому разнообразию бентоса — одному из наиболее простых показателей, были рассчитаны по доступным данным, характеризовавшим ситуацию до 2000 г. и разрозненным материалам, предоставленным нам коллегами, за 2007–2009 гг. Результаты картирования показали, что на ряде прибрежных участков Невской губы изменения, произошедшие в бентосе, также соответствовали категории «катастрофические» [9, 26] (см. рис. 1).

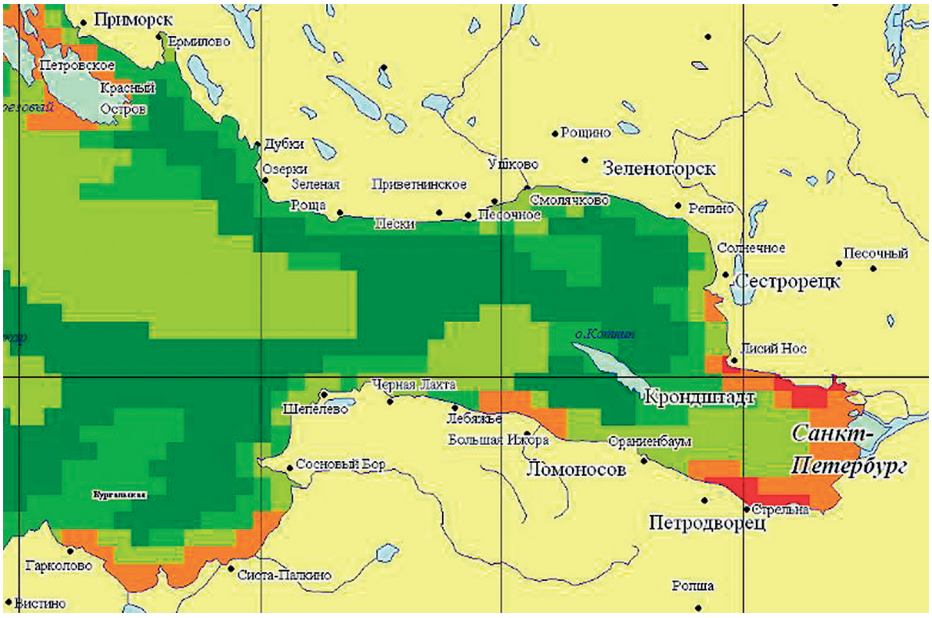

Рис. 1. Комплексная карта отклонений состояния бентоса от региональной нормы, построенная по индексу состояния биоты [9]. Темные участки соответствуют максимальным нарушениям, светлые — норме

Сходные результаты были получены экологами, изучавшими состояние бентоса в районах отвала грунта в Невской губе и в восточной части Финского залива [1, 3]. Специалистам, работающим в области биологического мониторинга, предлагается опробовать представленный подход (включая картирование результатов), выявить его возможности и ограничения и сообщить о достигнутых результатах одному из авторов настоящей публикации (pogrebov@ecopro.spb.ru).

Литература

1. *Голубев Д.А., Зайцев В.М., Клеванный К.А., Леднова Ю.А., Лукьянов С.В., Рябчук Д.В., Спиридонов, М.А., Шилин М.Б.* Комплексные экологические исследования состояния районов отвала грунта в Невской губе и в восточной части Финского залива. // Инженерные изыскания, 2010, № 5, с. 36–42.
2. *Голубев Д.А., Погребов В.Б., Шилин М.Б.* Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива по отношению к механическим воздействиям от подводных горнотехнических работ. // Инженерные изыскания, 2010, № 5, с. 34–43.
3. *Зайцев В.М., Клеванный К.А., Лукьянов С.В., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Шилин М.Б.* Оценка экологического состояния районов подводных отвалов грунта в Невской губе. // Гидротехника, 2010, № 2 (19), с. 59–63.
4. *Кийко О.А., Ланге Е.К., Усенков С. М., Стогов И.А.* Изменение состояния компонентов природной среды Лужской губы Финского залива при дноуглубительных работах. // 10-й Международный экологический форум «День Балтийского моря»: Тезисы докладов. — СПб.: Издательство «Макси-Принт», 2009, с. 177–178.
5. *Кийко О.А., Ланге Е.К., Усенков С. М., Стогов И.А.* Оценка качества вод и состояния донных отложений Лужской губы Финского залива в районе строительства МТП «Усть-Луга». // XII Международный экологический форум «День Балтийского моря»: Сборник материалов. — СПб.: Издательство ООО «Цветпринт», 2011, с. 68–70.
6. *Кудерский Л.А.* Рыбные ресурсы водоемов, связанных с трассами международных транспортных коридоров. // 6-я международная конференция и выставка AQUATERRA. — СПб., 2003, с. 109–113.
7. *Лаврентьева Г.М., Суслопарова О.Н., Богданов Д.В., Волхонская Н.И., Лебедева О.В., Максимова О.Б., Мицкевич О.И., Огородникова В.А., Терешенкова Т.В., Яковлев А.С.* Десятилетние итоги рыбохозяйственного мониторинга, выполнявшегося в Невской губе и сопредельных акваториях Финского залива с целью оценки воздействия гидротехнических работ на гидробионтов. // 6-я международная конференция и выставка AQUATERRA. — СПб., 2003, с. 113–116.
8. *Погребов В.Б.* Перспективы использования биомаркеров в нефтегазовом освоении Арктического шельфа. // Основные концепции современного берегопользования. Т. 3. — СПб.: изд. РГГМУ, 2011, с. 62–96.
9. *Погребов В.Б.* Оценка и картирование состояния морской среды по бентосу на примере Финского залива Балтийского моря. // 11-й Международный экологический форум «День Балтийского моря»: Тезисы докладов. — СПб.: Издательство «Макси-Принт», 2010, с. 181–184.
10. *Погребов В.Б., Позднышев С.П., Филиппов А.А., Усенков С.М., Дмитриев Н.В.* Экологическая чувствительность морских и прибрежных сообществ Черного моря к операциям по разведке, добыче и транспортировке нефти. // Труды 9-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2009). — СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009, с. 291–297.
11. *Погребов В.Б., Сагитов Р.А., Дмитриев Н.В.* Природоохранный атлас Российской части Финского залива. — СПб.: Тускарора, 2006. — 60 с.
12. *Погребов В.Б., Шилин М.Б.* Экологический мониторинг прибрежной зоны арктических морей. — СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. — 96 с.
13. *Погребов В.Б., Шилин М.Б.* Экологический мониторинг береговой зоны. // Основные концепции современного берегопользования. Т. 1. — СПб.: изд. РГГМУ, 2009, с. 95–123.
14. Рабочий проект опытно-промышленной добычи «Карьер железомарганцевых конкреций Северная-1». Охрана окружающей среды. Т. 2. Оценка воздействия на окружающую среду. Отчет. Фонды ЗАО «Экопроект». — СПб., 2004.

15. *Садиков М.А., Погребов В.Б., Беляев В.Н., Кийко О.А., Шилин М.Б.* Методология изучения экосистем. — СПб.: изд. ВНИИ Океангеология, 2005. — 208 с.
16. *Филиппов А.А., Намятов А.А., Ланге Е., Стогов И.А., Чивилев С.М.* Трансформация планктона и бентоса восточной части Финского залива под влиянием процесса добычи ЖМК. // 7-й Международный экологический форум «День Балтийского моря»: Тезисы докладов. — СПб.: изд. «Диалог», 2006, с. 211–212.
17. *Филиппов А.А., Кийко О.А., Ланге Е.К., Стогов И.А.* Результаты двухгодичного мониторинга влияния добычи ЖМК в Финском заливе на гидробиокомплексы района проведения работ/ // 8-й Международный экологический форум «День Балтийского моря»: Тезисы докладов. — СПб.: изд. «Диалог», 2007, с. 118–119.
18. *Шилин М.Б.* Экологическая безопасность дреджинга в современном мире — взгляд из Санкт-Петербурга. // Гидротехника, 2009, № 4 (17), с. 47–49.
19. *Шилин М.Б., Голубев Д.А.* Экологическая безопасность дреджинга в современном мире. // Гидротехническое строительство, 2010, № 3, с. 52–55.
20. *Шилин М.Б., Погребов В.Б.* Экологическая чувствительность береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу. // Основные концепции современного берегопользования. Т. 3. — СПб.: изд. РГГМУ, 2011, с. 168–189.
21. *Шилин М.Б., Погребов В.Б., Лукьянов С.В., Мамаева М.А., Леднова Ю.А.* Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 25, с.107–122.
22. Экологическое обеспечение проведения морской сейсмической разведки. Т. 2. Оценка воздействия на окружающую среду Западно-Черноморского лицензионного участка ОАО НК ЮКОС. Отчет. // Фонды ЭКОПРОЕКТ. — СПб., 2001.
23. *Holling C.S.* Adaptive environmental assessment and management. — John Wiley & Sons: Chichester, New York — Brisbane — Toronto, 1986.
24. *Kiyko O.A., Lange E.K., Pogrebov V.B., Stogov I.A., Filippov A.A., Usenkov S.M.* Monitoring of the consequences of disposal of bottom sediments in the Gulf of Finland. // Eco-friendly Dredging in the Modern World. International Seminar on Sustainable Dredging and Marine Construction. — St. Petersburg, 2009. — [http://www.cedaconferences.org/documents/dredgingconference/html_page/12/p-3.3-kijko.pdf].
25. *Pogrebov V.B.* Environmental Impact Assessment (EIA) of the iron-manganese nodules extraction from the seabed of the Gulf of Finland on its biological resources. // Eco-friendly Dredging in the Modern World. International Seminar on Sustainable Dredging and Marine Construction. — St. Petersburg, 2009. — [http://www.cedaconferences.org/documents/dredgingconference/html_page/12/p-4.2-pogrebov.pdf].
26. *Pogrebov V.B.* Assessment and mapping of the marine environment state basing on the benthos indices on the example of the Gulf of Finland, the Baltic Sea. // 11th International Environmental Forum «Baltic Sea Day»: Abstracts. — St. Petersburg: Publishing House «Maxi-Print», 2010, p. 436–437.
27. *Thomassen J., Moe K.A., Brude O.W., Chivilev S.M., Pogrebov V., Gavrilo M., Zubarev S., Khlebovich V., Semanov G.* A Guide to EIA implementation in INSROP phase 2. INSROP Working Paper II.5.10, 1999, No. 142–1999.

Н.С. Царькова

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ВОДНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ НА ПРИМЕРЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ В ЛУЖСКОЙ ГУБЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

N.S. Tsarkova

MODELING OF PROCESS OF TRANSFER OF THE WEIGHED SUBSTANCES WHEN CARRYING OUT DREDGING WORKS IN THE LUGA BAY OF THE GULF OF FINLAND

Даётся описание технологии моделирования распространения взвешенных веществ, основанной на аналитическом решении уравнения переноса для заданного поля скоростей течений. Приводится программный алгоритм решения поставленной задачи. Показываются результаты расчетов распространения полей мутности, выполненных на основании исходного поля скоростей, измеренного в пределах акватории Морского торгового порта Усть-Луга. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при решении задач прогноза воздействия взмучивания донных отложений на водный объект.

Ключевые слова: технология моделирования, аналитическое решение, уравнение переноса, водный объект, взвешенные вещества, поля мутности, дноуглубительные работы, Морской торговый порт Усть-Луга.

The description of the developed model of distribution of fields of the weighed substances from dredging works on the data received during environmental monitoring is given. The measured fields of speeds of currents are the basis for model of theoretical calculations. The method of measurement of a divergention of horizontal speeds of currents was developed, and supervision of this parameter within the water area of the Sea trade port of Ust-Luga was made. Calculations of distribution of the fields of turbidity during the dredging works were made on the basis of new methodical approach, for the solution the problem of transfer (the transfer equation, or the continuity equation), which will help to forecast the anthropogenic impact on water object.

Key words: the water object, the weighed substances, transfer, model.

Задача моделирования процессов переноса и распространения взвесей возникла в связи с оценкой масштаба их распространения при проведении дноуглубительных работ в пределах акватории Лужской губы, характеризующейся высокой степенью экологической уязвимости [1, 2].

В настоящее время методика прогнозирования распространения полей мутности разбивается на два этапа [3, 4]. Это — численные расчеты ожидаемых полей скоростей течений в проектируемом районе производства дноуглубительных работ, и последующие расчеты распространения полей мутности.

Точность таких расчетов определяется, главным образом, объективностью априорной информации, принимаемой за исходные данные при расчетах полей скоростей течений.

Альтернативная технология решения поставленной задачи заключается в измерении реальных полей скоростей течений в районе проведения дноуглубительных работ с последующими расчетами процесса распространения полей мутности.

Технология моделирования процесса переноса включает следующие этапы:

– аналитическое решение уравнения переноса;
– обработка данных измеренного поля скоростей течений;
– расчет развития полей мутности во времени;
– анализ и представление результатов.

Использование при расчетах результатов аналитического решения уравнения переноса имеет явные преимущества по сравнению с численными методами расчетов.

Аналитическое решение уравнения переноса

Процесс распространения смесей в водном объеме происходит как собственно за счет переноса взмученных веществ существующими течениями, так и за счет диффузии.

Так как скорости течений значительно меньше скорости распространения звука в воде, то полагаем, что фоновая, нормальная плотность воды постоянна, но изменяется при наличии взвеси. Процессами молекулярной диффузии также пренебрегаем, потому что они крайне медленны в масштабах времени перемещения взвесей.

В данном решении также пренебрегается возможностью возникновения конвективных течений вследствие достижения некоторых критических градиентов концентрации плотности. В глобальном смысле, линейные размеры полей мутности значительно превосходят вертикальные, поэтому возникновение конвективных течений указанной природы маловероятно.

При этих условиях уравнение переноса запишется в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot F = 0, \tag{1}$$

где C — концентрация взвешенных веществ; F — вектор плотности потока концентрации: $F = Cu$; u — вектор скорости; ∇ — оператор «набла».

Уравнение (1) выражает закон сохранения массы в любом потоке. Приток или сток некоторого количества взвесей в данную точку соответствует скорости изменения концентрации этих взвесей во времени.

Перепишем уравнение (1) в параметрах скорости и концентрации:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + C\nabla \cdot u + u \cdot \nabla C = 0. \tag{2}$$

Скорость гравитационного осаждения u_Z^g не зависит от собственно процесса переноса и координат, поэтому положим:

$$u_Z = \acute{u}_Z + u_Z^g, \tag{3}$$

где $\acute{u}_Z$ — вертикальная компонента скорости течения.

Если эта компонента равна нулю, что обычно и возникает на практике, то вертикальная компонента скорости будет определяться скоростью гравитационного осаждения взвесей, которую удобнее всего рассчитывать по формуле:

$$u_Z^g = \sqrt{\frac{d\left(\rho_v - \rho\right)g}{\xi\rho_v}}, \tag{4}$$

где d — диаметр частиц; g — ускорение свободного падения; Re — число Рейнольдса; ρ, ρ_v — плотность воды и взвеси.

Сразу заметим: в случаях, когда полагают, что вертикальная компонента равна нулю, в выражении (2) для дивергенции скорости необходимо использовать только горизонтальные компоненты.

В предположении, что скорости во времени не изменяются, преобразование Фурье в частотной области от левой и правой части (2) запишется в следующем виде:

$$i2\pi f C_f + C_f \nabla \cdot u + u \cdot \nabla C_f = 0, \tag{5}$$

где f — частота; i — мнимая единица; C_f — спектр концентрации.

Уравнение (3) решаем методом Фурье, полагая, что:

$$i2\pi f C_f + C_f \nabla \cdot u + u \cdot \nabla C_f = 0, \tag{6}$$

Подставляя соотношение (6) в (5), и выполнив элементарные преобразования, получаем:

$$\frac{u_x}{X}\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{u_y}{Y}\frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{u_z}{Z}\frac{\partial Z}{\partial z} = -\left(i2\pi f + \nabla \cdot u\right) = -\alpha_f \equiv const. \tag{7}$$

Правая часть этого выражения является определенной константой для любой заданной частоты. Если зафиксировать две координаты, например, z, y, а изменять третью (x), то для данной частоты, должно сохраняться некоторое значение α_f. Эквивалентным образом, это условие можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial X}{\partial x} = -\alpha_f \dfrac{X}{u_x} \\ \dfrac{\partial Y}{\partial y} = -\alpha_f \dfrac{Y}{u_y} \\ \dfrac{\partial Z}{\partial z} = -\alpha_f \dfrac{Z}{u_z} \end{cases} \quad \text{решение} \quad \begin{cases} X = X_0 e^{-\alpha_f \frac{x}{u_x}} \\ Y = Y_0 e^{-\alpha_f \frac{y}{u_y}} \\ Z = Z_0 e^{-\alpha_f \frac{z}{u_z}} \end{cases}$$

Подставляя данные решения в (6) окончательно получим:

$$C_f = C_{0f} e^{-(i2\pi f + \nabla \cdot u)(t_x + t_y + t_z)},$$

$$t_x = \frac{x}{u_x}; t_y = \frac{y}{u_y}; t_z = \frac{z}{u_z}, \tag{8}$$

где C_{0f} — спектр начальной концентрации в некоторой заданной точке.

Отметим, что компоненты вектора скорости являются инвариантами, тогда как составляющие x, y, z зависят от выбора системы координат. В уравнении (8) предполагается, что начало координат расположено в точке, где возникла аномальная концентрация. Следовательно, каждая спектральная компонента аномальной концентрации в некоторой точке экспоненциально убывает с расстоянием от этой точки, в зависимости от скорости потока и дивергенции скорости.

Заметим, что в решении (8) могут возникнуть сингулярности в случае равенства нулю одной из компонент скорости, или двух одновременно. Вернувшись к исходному преобразованию (7), мы видим, что эти члены просто обращаются в ноль, следовательно, и соответствующие локальные времена должны полагаться равными нулю.

Переход от решения (8), справедливого в частотной области, к временной, выполняется элементарно. Необходимо задать спектр аномальной концентрации в некоторой заданной точке, и выполнить обратное преобразование Фурье от (8).

Рассмотрим важные частные случаи.

Предположим, что начиная с некоторого момента времени, в некоторой точке возникает аномальная концентрация C_0, которая поддерживается на этом уровне в течение длительного времени.

Такой процесс во времени можно описать с помощью функции включения Хэвисайда, спектр которой выглядит следующим образом:

$$C_{0f} = C_0 \left[\frac{1}{2} \delta(f) - \frac{i}{2\pi f} \right], \tag{9}$$

где $\delta(f)$ — дельта-функция.

Подставим это выражение в (8) и выполним обратное преобразование Фурье.

$$C_t = C_0 e^{-\nabla \cdot u_0 (t_x + t_y + t_z)} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{2} \delta(f) - \frac{i}{2\pi f} \right] e^{-i2\pi f (t_x + t_y + t_z)} e^{i2\pi f t} df. \tag{10}$$

Здесь экспоненциальный множитель с локальными временами отвечает за смещение во времени, и решение для данного случая запишется в следующем виде:

$$C_t(r) = C_0(r_0) \sigma(t - t_{r0}) e^{-t_r \nabla \cdot u_0} + C_b,$$

$$t_{r0} = \left| \frac{x - x_0}{u_{0x}} \right| + \left| \frac{y - y_0}{u_{0y}} \right| + \left| \frac{z - z_0}{u_{0z}} \right|, \tag{11}$$

где $\sigma(t - t_0)$ — функция включения Хэвисайда в точке; C_b — фоновая концентрация.

Из решения следует, что если дивергенция скорости в точке возникновения аномальной концентрации равна нулю, то взвеси переносятся по направлению вектора скорости u_0 без изменения концентрации. Если дивергенция скорости больше нуля, то взвеси переносятся с уменьшением концентрации (разбавление), в противном случае концентрация возрастает при переносе.

Отметим, что решение (11) локально и выполняется на траектории, вдоль которой скорость u_0 неизменна.

В приведенном примере, в точке r_0 концентрация C_0 поддерживалась на заданном уровне «извне», что не соответствует практике. Поэтому положим, что начиная с некоторого момента времени, концентрация в этой точке нарастает с постоянной скоростью C_{0t}. Из предыдущего изложения очевидно следует, что экспоненциальный множитель с локальными временами определяет смещение задаваемого сигнала во времени. Соответственно обратное преобразование Фурье определит этот сигнал, смещенный на время t_{r0}. Поэтому сразу запишем решение во времени для данного случая.

$$C_t\left(r\right) = C_{0t}\left(r_0\right) t \Pi_T\left(t - t_{r0} - T\right) e^{-t_r \nabla \cdot u_0} + C_b, \tag{12}$$

где $2T$ — интервал времени, в течение которого действует источник с заданной производительностью C_{0t}; $\Pi_T(t)$ — прямоугольная селектирующая функция, которая определяется следующим образом:

Решение (12) для этого случая, в отличие от (11), уже будет зависеть от соотношения величины C_{0t}, скорости, и величины дивергенции скорости.

В соответствии с (7) определим величину dt_{r0}, то есть, будем рассматривать элементарный объем $dx_0 dy_0 dz_0$ вокруг источника взвесей. Предположим, что скорость течения, и дивергенция скорости в этой точке таковы, что некоторая концентрация C_{0c} в ней сохраняется постоянной во времени, что выполнятся при условии:

$$dt_{r0} \nabla \cdot u_0 = \frac{\ln\left(dt_{r0} C_{0t}\left(r_0\right)\right)}{C_{0c}\left(r_0\right)}. \tag{13}$$

Если левая часть этого соотношения больше правой, то поступающая взвесь быстро выносится из источника, и концентрация будет сохраняться на уровне фоновой.

В случае, когда левая часть (13) будет меньше правой, поступающая взвесь будет заполнять собой прилегающее пространство.

Для первых двух случаев взвесь будет перемещаться по некоторой траектории. В предположении, что скорости не изменяются во времени, эта траектория будет совпадать с линиями тока. Если допустить, что на всей траектории от точки r_0 до точки r_1 взвеси нигде не накапливаются (первые два случая), то решение (13) можно обобщить.

$$C_t\left(r_1\right)=C_{0t}\left(r_0\right)t\int_{r_0}^{r_1}\Pi_T\left(t-\frac{t_r}{2}\right)e^{-tr\nabla\cdot u}\frac{u\cdot dr}{|u||dr|}+C_b. \tag{14}$$

Причем здесь интегрирование ведется вдоль линий тока, отвечающих уравнению:

$$\frac{dx}{u_x}=\frac{dy}{u_y}=\frac{dz}{u_z}. \tag{15}$$

В случае, когда скорость поступления взвесей меньше скорости выноса, последние будут заполнять некоторый объем до тех пор, пока не наступит динамическое равновесие — поток выноса взвесей через поверхность этого объема станет равным потоку из источника. Математически это условие выражается в следующем виде.

$$C_{0t}\left(r_0\right)t\Pi_T\left(t-\frac{dt_r}{2}\right)e^{-dt_r\nabla\cdot u_0}=\int_{S_0}C_{S_0}\left(r\right)\frac{u\cdot dS_0}{|u||dS_0|}, \tag{16}$$

где $dS_0(r)$ — единичный вектор нормали к элементу поверхности dS_0.

Аналогичное условие равенства потоков, за вычетом количества осевших взвесей, должно выполняться и для некоторой точки r_1, лежащей на траектории $r_0 \div r_1$.

$$\int_{S_0}C_{S_0}\left(r\right)\frac{u\cdot dS_0}{|u||dS_0|}-\int_{t_{r0}}^{t_{r1}}C_t\left(r\right)\frac{z}{u_Z^g}dt_r=\int_{S_1}C_{S_1}\left(r_1\right)\frac{u\cdot dS_1}{|u||dS_1|}. \tag{17}$$

Следовательно, в данном случае, вместо траектории мы уже будем иметь трубку тока, с начальным и конечным сечениями S_0, $S_1$1. Внутри этой трубки будет проходить линия тока, соединяющая точки r_0, r_1.

Таким образом, формулы (12, 14, 15) совместно с условиями (16, 17) являются решением поставленной задачи.

Исходные данные и их предварительная обработка

Все измерения скоростей выполнялись измерителем течений «Вектор-2», который измеряет две ориентированные горизонтальные компоненты скорости.

Как следует из приведенного решения, большое значение имеет представление о величинах дивергенции скорости в Лужской губе. Из простых физических соображений вытекает, что дивергенция скорости должна быть равна нулю.

Для оценки величины дивергенции, была изготовлена установка из двух, параллельно ориентированных измерителей «Вектор-2», с помощью которой были проведены измерения в нескольких точках. В десяти процентах случаев дивергенция не равнялась нулю в пределах погрешности измерений, откуда следует вывод, что дивергенцией скорости пренебрегать нельзя.

Полевые измерения скоростей велись параллельно с другими работами, связанными с мониторингом, и пункты наблюдений согласовывались с заказчиком, в связи с чем сеть пунктов наблюдений оказалась неравномерной (рис. 1, 2). Отдельно измерялась скорость в источнике — проектируемом месте ведения дноуглубительных работ.

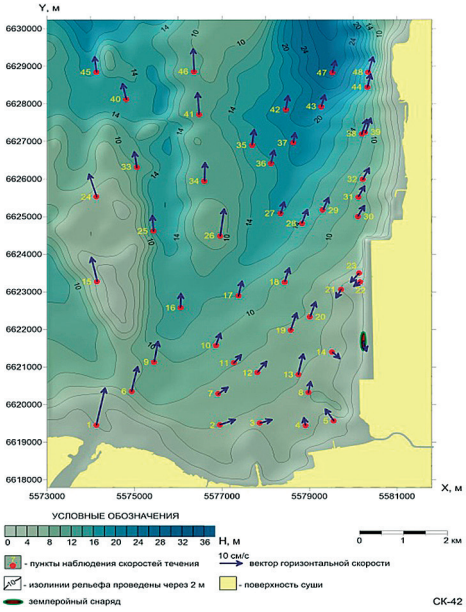

Рис. 1. Скорости и направления течений в поверхностном горизонте

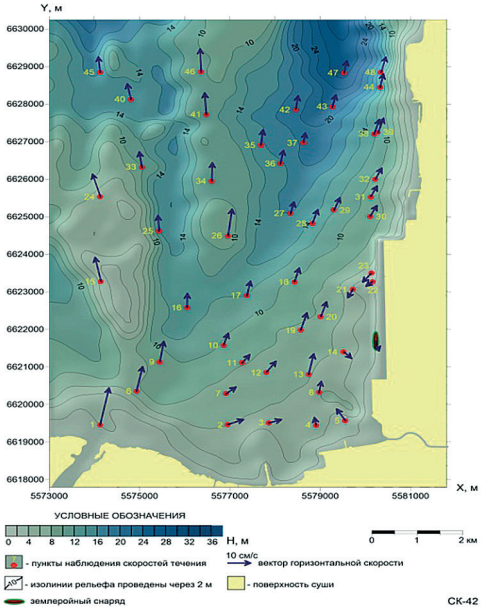

Рис. 2. Скорости и направления течений в придонном горизонте

На этапе предварительной обработки данные, полученные по нерегулярной сети наблюдений, интерполировались сплайнами на прямоугольную сеть 100×100 м.

Каждая точка исходных данных смещалась в случайном направлении на относительное расстояние, пропорциональное модулю вектора скорости. Этот результат вторично интерполировался на прямоугольную сеть 100×100 м. Разница между двумя результатами принималась за величину дивергенции скорости.

Численная реализация

Исходные данные:

– поле скоростей течений;
– координаты источника взвесей, скорость течения, и производительность источника (C_{0t}).

Алгоритм расчета:

– строится траектория движения в заданном поле скоростей: от источника до выхода за границы заданного планшета съемки;

– рассчитывается динамическое сечение равновесия потоков в источнике;
– по образующей сечения строится поверхность трубки тока до следующей точки найденной траектории, и находится площадь сечения трубки в этой точке;
– рассчитывается динамическое сечение равновесия потоков в этой точке и сравнивается с сечением трубки тока: если сечение трубки больше динамического сечения, то за основу построения следующей трубки тока выбирается это сечение, в противном случае — не изменяется;
– пункты 3–4 алгоритма повторяются для построения всех последующих трубок тока, вдоль найденной траектории перемещения взвесей;
– рассчитываются концентрации взвесей внутри всех найденных трубок тока, с учетом разрывов сечений на сопряжениях.

Анализ результатов

На рис. 3, 4 приведены результаты расчетов полей мутности, распространяющихся через 35 и 62 ч после начала ведения дноуглубительных работ.

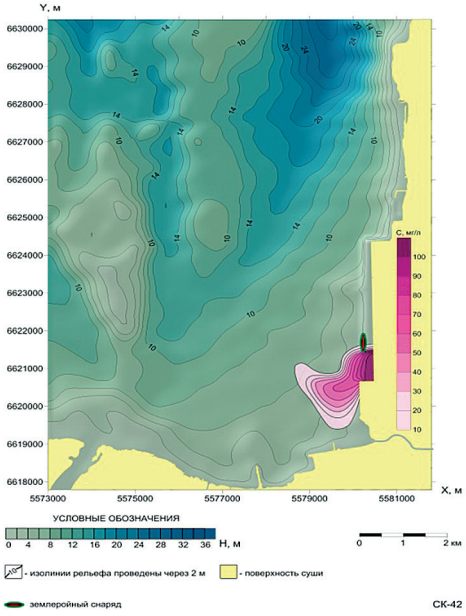

Рис. 3. Распространение полей мутности при проведении дноуглубительных работ через 35 ч работы

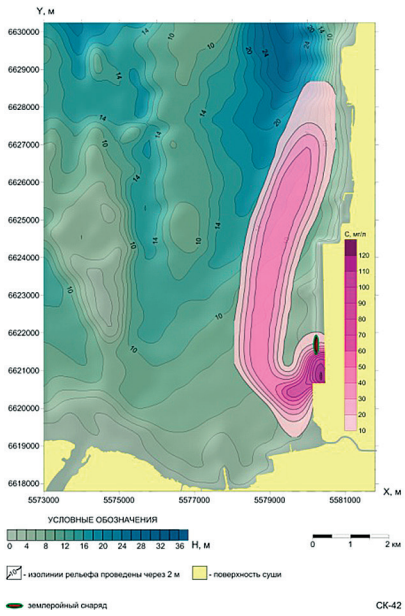

Рис. 4. Распространение полей мутности при проведении дноуглубительных работ через 62 ч работы

На практике, величина предельно допустимой концентрации взвесей составляет 10 мг/л. По этой изолинии, площади полей мутности через 20, 35 и 62 ч после начала их развития составили соответственно 1,31, 3,58 и 14,22 км^2, средняя скорость приращения площади распространения поля мутности составляет 0,1 км^2/час. Таким

образом, можно рассчитать среднее приращение площади поля мутности после 62 ч начала ведения дноуглубительных работ на любой последующий момент времени.

Выводы

Получено строгое аналитическое решение уравнения переноса, которое может применяться в любой области, где необходимо рассчитать распространение взвесей в поле заданных скоростей и источников.

На примере ведения дноуглубительных работ в пределах акватории Лужской губы показана эффективность технологии моделирования процесса распространения взвесей.

Литература

1. *Мандрыка О.Н., Шилин М.Б., Коузов С.А., Лукьянов С.В.* Солвременное состояние, разнообразие и уязвимость сообществ Кургальского рифа. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 31, с. 104–119.
2. *Шилин М.Б., Погребов В.Б., Лукьянов С.В., Мамаева М.А., Леднова Ю.А.* Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 25, с. 107–122.
3. *Ландау Л.Д, Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. VI, 3-е изд. перераб. и доп. — М.: «Наука», 1986.
4. *Гулд Х., Тобочник Я.* Компьютерное моделирование в физике. В 2-х частях. Часть 2: Пер. с англ.: А.Н. Полюдова, В.А. Панченко. — М.: Мир, 1990. — 400 с.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ БЕРЕГОВОЙ ЗОНОЙ

М.Р. Кононенко, И.М. Марковец, Э.В. Подгайский

ПОДХОДЫ К МОРСКОМУ ПРОСТРАНСТВЕННОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ В АКВАТОРИИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

M.R. Kononenko, I.M. Markovets, E.V. Podgaiskiy

APPROACHES TO MARINE SPATIAL PLANNING IN THE GULF OF FINLAND

Статья посвящена анализу возможностей морского пространственного планирования в акватории Финского залива и рассматривает необходимые условия его эффективной реализации.

Ключевые слова: морское пространственное планирование, морехозяйственная деятельность, политика пространственного развития.

The article is devoted to the analysis of possibilities of marine spatial planning in the Gulf of Finland and considers necessary conditions for its effective implementation.

Key words: marine spatial planning, maritime activities, the policy of spatial development.

Стратегией развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г. [1] определен переход к комплексному планированию развития приморских территорий и прибрежных акваторий путем выделения их в единый объект государственного управления. Это означает, что при формировании стратегий и программ социально-экономического развития регионов необходимо в качестве ***самостоятельного компонента*** отразить меры по комплексному развитию приморских территорий и прибрежных акваторий. Данное положение направлено на повышение вклада морской деятельности в социально-экономическое развитие приморских территорий.

Одним из перспективных направлений улучшения системы управления морской деятельностью, обозначенных Стратегией развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г., названо развитие морского пространственного планирования (МПП). Цель морского пространственного планирования — обеспечить более рациональное использование морского пространства с учетом взаимодействия между различными морепользователями, сбалансировать требования экономического развития с необходимостью защиты окружающей среды, содействовать достижению социальных и экономических целей путем планирования и открытого обсуждения [2, 3].

Неразвитость пространственного планирования означает отсутствие стратегического понимания будущего развития акватории. Фактически, пространственное планирование зачастую подменяется «ручным управлением», приводящим к перекосам в использовании морских пространств, недобросовестной конкуренции. В случае если нет внятных правил использования морских пространств, возможно двойное негативное воздействие. С одной стороны, бизнес/отрасли имеют возможности «продавливать» решения, обеспечивающие только отраслевые интересы, не заботясь об интегральном эффекте развития акватории и региона в целом. С другой стороны, компании, в отсутствии системы пространственного планирования, проходят сложную процедуру согласований, которая может оборваться на самом последнем этапе, когда уже потрачены значительные суммы на детальное проектирование. Поэтому, важнейшая задача государства — минимизировать данные неэффективные затраты как природопользователей, так и общества в целом путем научного обоснования и выделения различных зон прибрежных территорий и акваторий с определением режима их использования. В этом заинтересованы все: и исполнительная власть, которая нуждается в четких основаниях для принятия решений и, конечно, бизнес, поскольку данные стандарты позволяют снизить возможность произвола со стороны чиновников. Кроме того, МПП предполагает упрощение и упорядочение процедур, связанных с получением разрешительной документации, что при сегодняшней чрезмерной бюрократизации процесса является значительным шагом навстречу интересам инвесторов. Все это способствует снижению риска инвестиций в строительство.

Таким образом, морское пространственное планирование позволяет не только поставить бизнес в определенные рамки, но и дать толчок развитию, достигая как экологических, так и экономических целей. Особенно это актуально для Балтийского моря, что связано с высокой концентрацией природопользователей на данной акватории, а также благодаря значительному количеству международных инициатив.

В настоящее время в регионе Балтийского моря активно развиваются процедуры внедрения МПП, в частности, через международную программу ВАСАБ (VASAB — Vision and Strategy around the Baltic Sea) [4]. Деятельность ВАСАБ направлена на гармонизацию подходов к МПП на межнациональном уровне, на выработку единых принципов и технологий МПП в различных странах Балтийского региона. ВАСАБ были сформулированы 10 основных принципов морского пространственного планирования, которые, хотя и ориентированы на регион Балтийского моря, но могут быть использованы в контексте более широкого географического применения.

Развитие морского пространственного планирования на российской акватории Финского залива находится на начальной стадии. Ожидаемый положительный эффект от внедрения МПП связывается с более эффективным использованием морских пространств, уменьшением транзакционных издержек, а также снижением конфликтности в многоцелевом использовании морских ресурсов.

При использовании пространственного планирования в качестве инструмента использования прибрежных ресурсов необходимо учитывать:

– природные свойства прибрежной зоны, которые могут либо способствовать, либо препятствовать размещению того или иного природопользователя и, соответственно, прогнозируемые ограничения ее использования;

– текущее использование соответствующей территории, возможные направления ее развития, результаты оценки воздействия существующих и планируемых для размещения объектов на комплексное развитие соответствующей территории;
– «запросы отраслей», т.е их перспективные потребности в морских пространствах, выраженные в стратегиях и программах развития отдельных отраслей экономики, а также национальные проекты, межгосударственные программы, с тем чтобы согласовать интересы отраслей относительно определенного пространства.

В рамках исследовательской работы по проекту Европейского Союза BaltSeaPlan авторами рассматривалось влияние отраслевых политик России на морское пространственное планирование акватории Балтийского моря. Согласно методологии проекта, процедура пространственного планирования должна начинаться с анализа документов стратегического характера, принятых в странах, использующих Балтийское море. Это необходимо с тем, чтобы уже на ранних этапах, еще до реализации принятых стратегиями решений, вскрыть противоречия, вызванные отраслевым подходом в планировании. Действительно, морское пространственное планирование определяет развитие территории на многие годы. Поэтому необходимо провести инвентаризацию тех документов, которые определяют будущее развитие, так же как и возможные конфликты.

В рамках проекта был выполнен анализ 16 принятых в России стратегических документов различных отраслей, включая транспортную, энергетическую, геологическую, туризма и других, которые оказывают влияние на использование акватории Финского залива. Это влияние может быть ***прямым***, т.е. касаться использования акватории либо путем создания правовых или административных условий для этого, либо предлагая конкретные политически признанные цели, задачи и принципы. Влияние может быть ***опосредованным***, через создание мощных стимулов или, напротив, демотиваторов для использования акватории моря (например, финансовая поддержка). Также выделялось ***косвенное*** воздействие, признавая, что влияние отраслевых стратегических документов на использование акватории моря может быть оказано при помощи повышения осведомленности, смены приоритетов и ценностей у лиц, принимающих решения, или воздействуя на доступность морских ресурсов или неадминистративных условий их использования.

Кроме того, требовалось оценить степень влияния каждого документа на МПП, с точки зрения вероятности осуществления мероприятий, указанных в стратегии (сильное или слабое влияние).

В рамках работы проведена тщательная инвентаризация пространственных последствий и потенциальных конфликтов осуществления отраслевых стратегий, а также выявление возможностей и требований пространственного планирования с целью недопущения указанных конфликтов.

Анализ существующих документов показал, что специальные политики «морской» направленности в России развиты незначительно. В отдельных документах морское направление представлено (например, транспортная, энергетическая, туристическая стратегии), однако часть политик, таких как стратегия сохранения культурного наследия и развивающиеся кластерные инициативы не выделяет морское направление

в отдельную категорию [2]. Данный факт демонстрирует недооценку роли морского природопользования в развитии страны, что приводит к разрозненным решениям в данной сфере.

Отсутствие отчетливой пространственной политики на государственном уровне приводит к тому, что вместо полноценного территориального планирования реализуется только перечень масштабных проектов общегосударственного значения. Давление ведомственного подхода в планировании взамен территориального (что заметно при анализе отраслевых стратегий), приводит к недоучету принципа системности в развитии, а также провоцирует потенциальные конфликты между природопользователями. Требуется централизованное государственное вмешательство в стихийный процесс реструктурирования пространства отдельными ведомствами.

Следует отметить, что если на государственном уровне стратегические документы охватывают почти весь перечень сфер, представленных методикой BaltSeaPlan для анализа, то на региональном, межрегиональном и муниципальном уровне получили развитие лишь отдельные стратегии. Многие созданные на региональном уровне документы (Санкт-Петербург) не имеют реальных рычагов внедрения, так как основная часть функций по внедрению остается в сфере ответственности федеральных служб.

Работа по анализу документов позволила сформулировать основные рекомендации для морского пространственного планирования на акватории Финского залива:

– для целей МПП необходимо организовать получение своевременной информации о качестве окружающей среды, об экологически чувствительных акваториях и др., включая организацию мониторинга;
– МПП должно учесть возможные ограничения при использовании акваторий, используя экосистемный подход;
– МПП должно учесть возможность изменения геоморфологии берегов и дна, следовательно, возникновение неудобств (ущербов) у природопользователей, а также закладывать мероприятия по защите берегов;
– МПП должно учитывать территориальный масштаб воздействия тех или иных видов морепользования, а также принять во внимание специфические риски в связи с конкретным использованием акватории;
– необходимо предусмотреть резервирование мест для расширения природоохранной инфраструктуры (места для природоохранного флота, мощность очистных сооружений и др.);
– трансграничная координация и консультации должны быть также предусмотрены не только в связи с морскими перевозками и в вопросах безопасности РФ, но и в других секторах морского использования;
– необходимо внедрение инструментов для непрерывного процесса планирования;
– проблемы изменения климата должны найти отражение в разрабатываемых стратегиях;
– национальные морские политики должны быть расширены в таких областях, как туризм, сохранение подводного наследия, развитие морских охраняемых территорий;
– учет кластерного подхода при формировании стратегии МПП.

Для рационального использования морских акваторий следует разработать процедуру непрерывного согласования между собой отраслевых интересов в процессе планирования роста хозяйственной деятельности. Морское пространственное планирование в перспективе может и должно способствовать подъёму конкурентоспособности морского хозяйства, стимулировать экономический рост и создание новых рабочих мест.

Литература

1. Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г. (утв. распоряжением Правительства РФ от 8 декабря 2010 г. № 2205-р).
2. *Кононенко М.Р.* Обоснование рекомендаций по формированию и развитию морского кластера в Ленинградской области. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 27, с. 221–231.
3. *Кононенко М.Р., Шилин М.Б.* Стратегии планирования в комплексном управлении прибрежной зоной. — СПб.: РГГМУ, 2003. — 151 с.
4. [www.vasab.org].

А.Н. Чусов, М.Б. Шилин, Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев, А.В. Тимошина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАМЫТОЙ БЕРЕГОВОЙ ТЕРРИТОРИИ В НЕВСКОЙ ГУБЕ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛАХТА-ЦЕНТРА

A. Chusov, M. Shilin, D. Ryabchuk, A. Sergeev, A. Timoshina

CONSTRUCTION OF LAHTA-CENTER ON THE RECLAIMED COASTAL TERRITORY IN THE NEVA BAY

Рассмотрено значение осуществления строительства здания-символа на намытой береговой территории в Невской губе для Санкт-Петербурга. Проведена оценка геоэкологической устойчивости территории строительства Лахта-Центра по результатам мониторинговых работ. Обсуждаются возможные методы берегозащиты.

Ключевые слова: намывные территории, здание-символ, геоэкологическая обстановка.

The importance of the construction of the Iconic Buildings on reclaimed coastal territory in the Neva Bay for the St. Petersburg is considered. The geo-ecolological sustainability of construction area of Lakhta-Center by results of the monitoring is estimated. Possible methods of coastal protection are discussed.

Key words: reclamated areas, iconic building, geoecological situation.

Проекты, реализуемые на искусственно созданных (обычно — путем намыва) береговых территориях, являются важным фактором развития инфраструктуры приморских городов во многих странах мира [3, 6]. В пределах городской черты Санкт-Петербурга на намытых территориях к настоящему времени сформирован новый пассажирский портовый комплекс «Морской фасад», разбит парк 300-летия Санкт-Петербурга, ведется строительство аванпорта Бронка [7, 8].

10 марта 2011 г. компания Газпром приобрела участок общей площадью 140 тыс. м^2 для строительства офисного здания общественно-делового Лахта-Центра на северном берегу Невской губы в районе Лахтинского разлива. Весь участок находится в пределах искусственно сформированной методом намыва и подсыпки грунта береговой территории. В 1970-е гг. здесь был спроектирован и организован склад песка, который до 2011 г. занимал основную площадь участка, а также были построены эстакады, несколько складских и производственных корпусов. Береговая полоса, являющаяся южной границей участка, имеет искусственное (антропогенное) происхождение и укреплена каменными валунами, в основании которых уложены бетонные блоки (рис. 1, слева). Пляж представляет собой свалку обломков кирпича и остатков бетонных конструкций (рис. 1, справа).

Валунно-глыбовая отсыпка в настоящее время надежно предотвращает размыв и отступание берега, однако резко снижает его рекреационный потенциал и эстетическую ценность (рис. 2).

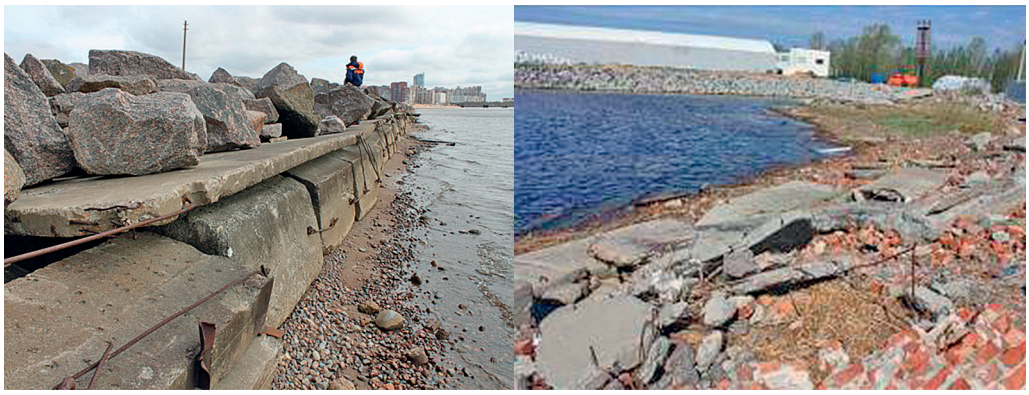

Рис. 1. Бетонные блоки основания (слева) и общий вид техногенного пляжа в районе строительства Лахта-Центра

Рис. 2. Валунно-глыбовая отсыпка (лето) и общий вид южной границы участка территории Лахта-Центра (зима)

Строительство Лахта-Центра, таким образом, не предполагает разрушение каких-то исторически сложившихся ландшафтов или экологически ценных биологических сообществ.

Комплекс Лахта-Центра включает в себя «Башню» офисного центра; здание с атриумом, состоящее из северного и южного блоков, объединенных атриумом; стилобатную часть с аркой главного входа.

Технико-экономические показатели зданий комплекса:

– здание «Башни»: количество этажей — 86 надземных и 3 подземных; абсолютная отметка верха шпиля — до 500 м;
– здание с атриумом: количество этажей — от 6 до 16 надземных и один подземный;
– стилобатная часть: количество этажей — один-два надземных и один подземный.

Общая площадь Лахта-Центра — 385 000 м^2, в том числе: здание Башни — 147 000 м^2; здание с атриумом — 95 000 м^2; стилобатная часть — 143 000 м^2.

В случае реализации проекта, здание Лахта-Центра должно стать самой высокой постройкой в России и в Европе (рис. 3). 86 надземных этажей «Башни» будут нанизаны на центральный силовой элемент — «ядро». Внутри «ядра» будут установлены все вертикальные коммуникации. Железобетонные распорки от «ядра» к внешним колоннам через каждые 70 м уменьшат горизонтальные колебания здания в случае сильных порывов ветра или землетрясений, а металлические балки межэтажных перекрытий обеспечат надежную связь внешних колонн здания с центральным ядром. Обеспечение стабильности основы здания должно быть достигнуто использованием рекордных объемов бетона: объем бетонирования нижней плиты фундамента башни составит 24 тыс. м^3 бетона, а вместе с верхней плитой будет залито 46 тыс. м^3.

Неподалеку от Лахта-Центра планируется разместить новую станцию метро «Лахта». Только 43 % общей площади общественно-делового центра будет отведено под офисы, а в остальных помещениях расположатся социальные объекты: медицинский центр с педиатрическим отделением, детский образовательный центр, спортивный комплекс, планетарий, конференц-зал на 500 мест, общедоступная смотровая площадка, выставочные пространства, торговые зоны, кафе и рестораны. Более 10 га территории общественно-делового центра (30 % площади) будет отведено под зеленые зоны (парки и скверы).

Рис. 3. Проект общественно-делового центра «Лахта» (Лахта-Центра) (www.proektvlahte.ru)

Расположение здания и его высота сделают «Башню» Лахта-Центра одним из новых символов Санкт-Петербурга и будут способствовать популярности нового объекта у туристов. Здания-символы («Iconic Buildings») — как исторические, так и

современные — являются наиболее популярными объектами сегодняшнего массового туризма. Посещение и фотографирование таких знаковых зданий составляет основную цель большинства путешествий. Обязательным условием попадания здания в «знаковую категорию» является его ярко выраженная принадлежность к определенной нации, архитектурному направлению или эпохе. Нельзя не отметить также тенденцию в стремлении архитекторов постоянно увеличивать высоту здания, что приводит к своеобразному «состязанию» доминант.

17 августа 2012 г. Служба государственного строительного надзора и экспертизы Санкт-Петербурга разрешила строительство первого этапа Лахта-Центра.

6 июля 2012 г. 36-я Сессия Комитета Всемирного наследия ЮНЕСКО подтвердила, что строительство Лахта-Центра не окажет негативного влияния на историческую панораму Санкт-Петербурга. Из центра Санкт-Петербурга башню будет видно, но при этом в связи со значительной удаленностью она не будет выделяться на фоне других объектов — таких, как давно ставшая привычным элементом городского ландшафта вышка Телевизионного центра и др.

Комплекс общественно-делового Лахта-Центра станет важным элементом инфраструктуры северного берега Невской губы. Особенностью этого берега на всем протяжении от Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) на западе до Парка 300-летия Санкт-Петербурга на востоке является чрезвычайно высокое разнообразие природных условий и действующих факторов, что обусловлено сложностью геоэкологического каркаса (рис. 4).

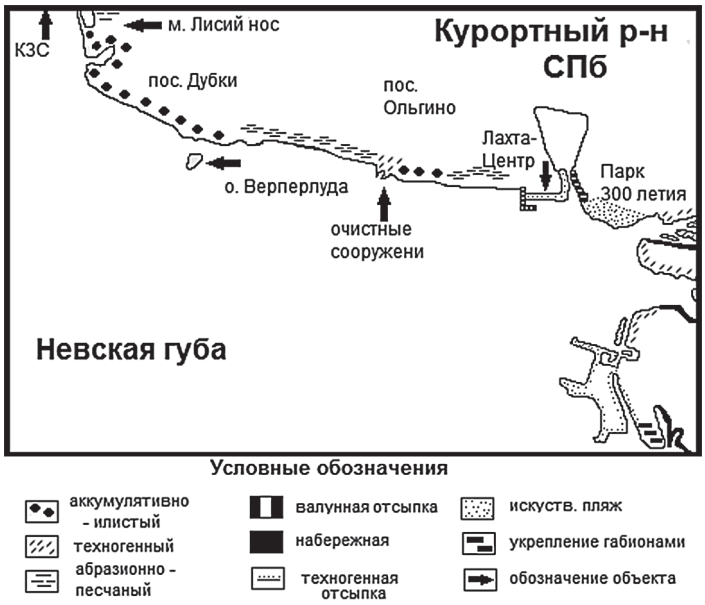

Рис. 4. Типы берегов северной береговой зоны Невской губы

Согласно Карте комплексного геологического риска [5], территория строительства Лахта-Центра относится к зоне потенциально умеренного геологического риска. Основные геоэкологические риски, которые могут проявиться на рассматриваемой территории (в пределах рассматриваемой геосистемы), могут быть подразделены на эндо- и экзориски.

Эндориски обусловлены медленными, скрытопротекающими геологическими процессами. Невысокая интенсивность современных эндогенных процессов в исследованном районе позволяет оценить эндогенные риски как пренебрежимо малые.

Экзориски обусловлены относительно быстро протекающими седиментационными и денудационными процессами — такими, как взмучивание и переотложение донных осадков и экзогенная тектоника (оползни, обвалы, осыпи и другие следствия гравитационных деформаций). Скорости протекания и направление экзогенных процессов на различных участках побережья значительно изменились после введения в строй в августе 2011 г. и начала функционирования КЗС.

В западной части рассматриваемого участка береговой зоны активно проявляются процессы заболачивания, зарастания подводного берегового склона (ПБС), а также зафиксированы процессы размыва берегов. В районе пос. Ольгино наблюдается активная трансформация берега под действием волновых процессов.

В районе строительства Лахта-Центра валунно-глыбовая отсыпка достаточно надежно предотвращает размыв и отступание берега. Однако к востоку от Лахтинского разлива береговая зона характеризуется активной динамикой, особенно — в субаквальной части. В частности, на набережной Парка 300-летия Санкт-Петербурга в настоящее время происходят деформация и интенсивный размыв техногенно сформированного пляжа (табл. 1).

В связи с общей сложностью геоэкологической обстановки на северном берегу Невской губы, мозаичностью абиотических условий среды и разнообразием действующих факторов, до начала строительства офисного здания Лахта-Центра было проведено исследование состояния намытого участка береговой зоны с целью определения запаса его устойчивости по отношению к ожидаемым нагрузкам. В мае 2013 г. была организована морская экспедиция на НИС «Мираж» и выполнены береговые маршруты в районе строительства Лахта-Центра и на прилегающих участках берега. На судне были осуществлены 11 профилей методом гидролокации бокового обзора (ГЛБО) и эхолотирования, а также выполнены 9 станций пробоотбора поверхностных донных отложений. ГЛБО позволяет получить оперативное представление о характере геологических процессов на поверхности дна, изучить формы рельефа, выявить площадь и характер распределения литологических разностей донных отложений, а также выявить характеристики потенциально опасных затопленных техногенных объектов. ГЛБО осуществлялась с помощью аппаратуры СМ-2 (С-МАХ, Великобритания). При проведении эхолотирования применялись два типа эхолотов — переносной эхолот фирмы HUMMINBIRD (США) — модель 450TX TRI BEAM и эхолот FURUNO. Отбор проб донного грунта производился с помощью ковша-дночерпателя грейферного типа и драги.

Таблица 1

Геоэкологические процессы, характерные для различных участков северного берега Невской губы

Береговая зона	Год	Тип береговой зоны	Процес
КЗС до мыса Лисий Нос	2013	техногенный	процесс абразии
м. Лисий Нос	2013	абразионный моренный	заиление приурезовой части
от Лисьего Носа до пос. Дубки	2013	абразионный валунный (моренный)	зарастание подводного берегового склона водной растительностью
к востоку от о-ва Верперлуда	2013	аккумулятивно-илистый	развитие гидрофитной растительности на подводном береговом склоне
к западу от пос. Ольгино	2013	сплошная полоса макрофитов	формирование узких песчаных пляжей
к востоку от Ольгино		песчаный пляж длиной 300 м и шириной от 5 до 15 м	подмыв корней деревьев, растущих на береговом уступе
далее	1978 и 1990	техногенные выступы	зарастание береговой зоны
	2001 и 2009		появление отдельных островков растительности
очистные сооружения в пос. Ольгино	конец 1980-х	техногенный тип	процесс создания намывных территорий (S = 44000 м^2)
	2001		сокращение территорий до 25000 м^2
	2009		сокращение территорий до 22000 м^2
к востоку от Ольгинских очистных сооружений	2013	узкие песчаные пляжи	активный размыв с формированием абразионных уступов
далее к востоку		валунник на подводном береговом склоне и приурезовой части пляжа, песок, гравий и галька	размыв (0,5–1 м/год), заростание тростником
пос. Лахта	1978	техногенный тип	значительно выдвинута и выровнена береговая полоса (S = 21000 м^2)
	1990		увеличение намывных территорий (S = 26 680 м^2)
	2009		сократилась степень зарастания (S = 29 530 м^2)
территория Лахта-Центра	2013	техногенный тип (свалка обломков кирпича и остатков бетонных конструкций, гранитная валунно-глыбовой отсыпка)	постоянство береговой линии
район пляжа им. 300-летия Санкт-Петербурга	2003–2006	берег техногенный, поднятый, с каменно-глыбовой отсыпкой. В приурезовой части подводного берегового склона — песчано-гравийная смесь	формирование пляжа
со стороны Лахтинского разлива	2013		процесс размыва
южное побережье	2006–2012	песчаный пляж с формами эоловой аккумуляции на техногенном основании (гранитные и железобетонные плиты)	пляжевая ступень сократилась на 25–34 м
восточная часть пляжа	2013	на подводном береговом склоне щебнево-глыбовая отмостка, подстилаемая песком	процесс размыва

Анализ материалов профилирования ГЛБО, эхолотирования и интерпретационного пробоотбора показал, что вся поверхность прибрежного мелководья территории Лахта-Центра в настоящее время покрыта «дреджинговым материалом» — грунтом, извлеченным в ходе строительства «Морского фасада» и углубления фарватеров и сброшенным в подводные отвалы. По данным Балтийской дирекции по техническому обеспечению надзора на море [2], в отвалы Северной и Южной Лахты за период 2005–2008 гг. было сброшено 21,4 млн м^3 грунта, изъятого при реконструкции фарватеров вблизи восточных берегов Невской губы и при реализации первой очереди проекта «Морской фасад».

Результаты исследований дополнены анализом космоснимков. Сравнение результатов спутниковой съемки рассматриваемого участка в 2004 г. (до введения в эксплуатационный режим КЗС) и в 2011 г. (после начала функционирования КЗС) позволяет сделать заключение об относительной стабильности береговой линии (рис. 5). Как видно из рис. 5, на котором наложены очертания береговой полосы по результатам съемки спутника Landsat 5, значительных смещений береговой линии в последнее время не произошло — ни в сторону размыва, ни в сторону приращения берега. Береговая линия по результатам анализа наложенных космоснимков может быть охарактеризована как относительно устойчивая.

Рис. 5. Состояние береговой полосы на участке территории строительства МК ЛЦ по результатам спутниковой съемки 2004 и 2011 г. (спутник Landsat; материалы предоставлены ведущим специалистом НИИ Космоаналитических Методов / НИИ КАМ к.г.н. Л.Л. Сухачевой)

Наиболее важной особенностью участка прибрежного мелководья в районе площадки Лахта-Центра является высокая степень нарушенности рельефа дна техногенными процессами (см. Статью в этом номере)). В результате осуществления работ по подводной добыче песка и отвалов грунта, проводившихся в ходе строительства

«Морского фасада» и углубления фарватеров [см. 1, 2, 8], здесь сформировался специфический техногенный рельеф, представляющий собой хаотичное распределение «пиков» (невыработанные остатки песчаной толщи) и карьеров относительной глубиной до 4–5 м. Длительное негативное воздействие изъятия, перемещения и складирования грунта в отвалы Невской губы привело к значительной деградации растительности на многих участках прибрежной зоны, что привело к изменению сообществ водной и береговой растительности и отразилось на трофической структуре экосистемы водоема. Сравнение профилей ГЛБО 66 (2008 г.) и 10 (2013 г.) указывает на активно происходящие процессы размыва отвалов грунта и оплывания склонов ранее сформировавшихся отвалов, в результате чего их площадь увеличивается, высота уменьшается, а рельеф выравнивается и сглаживается.

В то же время, по данным повторных наблюдений в период с 2009 по 2013 г. выявлено большое количество вновь появившихся отвалов грунта. На ряде участков дна глубины в результате сброса грунта уменьшились до 1–1,5 м и представляют реальную опасность для судоходства. Таким образом, подводный ландшафт в районе площадки Лахта-Центра находится в стадии формирования.

В связи с тем, что к западу от рассматриваемого отрезка береговой зоны наблюдается интенсивное развитие тростниковых зарослей, с высокой степенью вероятности можно утверждать, что прибрежные мелководья, примыкающие к береговой полосе участка строительства Лахта-Центра, в ближайшие годы подвергнутся естественному процессу зарастания тростником *Phragmites australis* (возможно также — камышом, рогозом и другими полупогруженными видами макрофитов). Это будет способствовать стабилизации береговой полосы, так как корневища тростника будут играть роль естественного каркаса для абиотического геологического материала. Развитию на прибрежных мелководьях зарослей тростника, стабилизирующих береговую полосу, в пределах рассмотренного участка способствуют следующие факторы: небольшие глубины (обычно — не более 50 см); мягкий илистый грунт с отдельными каменистыми участками; высокие скорости заиления, достигшие наибольших значений в последние годы перед введением в строй КЗС. Основной источник формирования камышово-тростниковых зарослей — занос фрагментов плавней с корневищами растений. Подобный занос представляется вполне вероятным в связи с современной структурой течений вдоль северного берега Невской губы, сформировавшейся после начала эксплуатации КЗС.

По результатам проведенных исследований отрезок береговой полосы участка строительства Лахта-Центра может быть признан одним из самых стабильных в пределах северного берега Невской губы. Проект общественно-делового центра не содержит в себе каких-либо экзогенных геоэкологических угроз береговой зоне и при его реализации в полном объеме будет способствовать стабилизации береговой полосы и формированию устойчивых экосистем как со стороны суши, так и со стороны прилегающих мелководий.

Выбор методов берегозащиты для реализации на участке Лата-Центра должен определяться как природными условиями, так и общим архитектурно-планировочным решением. Мировой опыт берегозащиты показывает, что наиболее приемлемым решением для рассматриваемого участка береговой полосы в соответствии с требованиями

СП 32-103-97 является создание искусственных пляжей в комплексе с пляжеудерживающими сооружениями. В конкретных условиях рассматриваемой береговой зоны необходимым условием стабильности искусственных пляжей является выравнивание рельефа дна подводных карьеров с воссозданием профиля динамического равновесия.

Защита берега с помощью волноотбойных стен или других волногасящих сооружений допускается в том случае, когда искусственное образование пляжа необходимой ширины технически и экономически нецелесообразно или принципиально невозможно. Применение вертикальных волноотбойных стен как единственного метода берегозащиты следует, по возможности, ограничивать, так как они могут стать причиной быстрого и необратимого размыва пляжей вследствие отражения волн (СП 32-103-97).

На рассматриваемом участке берега наиболее целесообразным в перспективе представляется создание променада с проницаемым укреплением откосного типа в основании. В этом случае также необходимо будет провести детальное изучение рельефа прилегающего участка дна акватории Невской губы и моделирование устойчивости берегозащитных конструкций при различных вариантах штормового воздействия на берегоукрепительные сооружения с учетом наличия подводных карьеров.

Строительство «здания-символа» Лахта-Центра и формирование сопутствующей инфраструктуры на искусственно созданной территории должно стать новым словом в использовании намытых береговых зон в городском строительстве и хозяйстве.

Литература

1. *Голубев Д.А., Зайцев В.М., Клеванный К.А., Леднова Ю.А., Лукьянов С.В., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Шилин М.Б.* Комплексные исследования состояния районов отвала грунта в Невской губе и восточной части Финского залива. // Инженерные изыскания, 2010, № 5, с. 36–42.
2. *Зайцев В.М., Клеванный К.А., Лукьянов С.В., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Шилин М.Б.* Оценка экологического состояния подводных отвалов грунта в Невской губе. // Гидротехника, 2010, № 2(19), с. 59–63.
3. *Макаров К.Н., Чусов А.Н., Шилин М.Б.* Строительство в прибрежных курортных регионах: взгляд из Сочи. // Гидротехника, 2012, № 4(29), с. 14–15.
4. *Малинин В.Н., Митина Ю.В., Шевчук О.И.* К оценке затопления побережья Курортного района Санкт-Петербурга при прохождении экстремальных наводненческих циклонов. // Ученые Записки РГГМУ, 2013, № 29, с. 136–142.
5. Геологический Атлас Санкт-Петербурга. Под ред. Филиппова Н.Б. — СПб., 2009. — 57 с.
6. *Чусов А.Н., Шилин М.Б., Гуляк Ю.В., Оболонская Т.М., Рябчук Д.В., Сычев В.И.* Современное состояние и возможные направления сукцессии геосистемы береговой полосы территории строительства многофункционального комплекса «Лахта Центр». // Морские берега — эволюция, экология, экономика. 24 Межд. Берег. конф. — Туапсе, 2012, с. 356–362.
7. *Шилин М.Б., Мамаева М.А., Леднова Ю.А., Волнина О.В.* Дреджинг как фактор оптимизации экологической ситуации в береговой зоне. // Гидротехника, 2012, № 1(26), с. 100–103.
8. *Шилин М.Б., Еремина Т.Р., Мамаева М.А.* Дреджинг наводит мосты. // В кн.: Экологические аспекты дреджинга. — СПб.: РГГМУ, 2013, с. 427–435.
9. [www.proektvlahte.ru].

ЭКОЛОГИЯ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ

С.А. Кондратьев, Д.А. Максимов, М.В. Шмакова, В.И. Уличев

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

S.A. Kondratyev, D.A. Maximov, M.V. Shmakova, V.I. Ulichev

MODEL FOR CALCULATION OF NUTRIENT LOAD ON AQUATIC SYSTEMS

На основе разработанных и апробированных моделей сформирована детерминировано-стохастическая модель стока и биогенной нагрузки на водные объекты. В результате проведенного моделирования выполнена оценка параметров функций распределения значений стока с Российской территории частного водосбора Финского залива и нагрузки общим фосфором и общим азотом на залив с водосбора, неконтролируемого системой мониторинга Росгидромета.

Ключевые слова: детерминировано-стохастическая модель, сток, биогенная нагрузка.

Determenistic-stochastic model of runoff and nutrient loading on water bodies was generated on the basis of developed and tested sub-models. As a result of simulation an estimation of distribution functions parameters for runoff from immediate unmonitored catchment, and total phosphorus and total nitrogen loading on the Gulf of Finland was made.

Key words: deterministic and stochastic model, runoff, nutrient load.

Эвтрофирование водных объектов (пресноводных и солоноводных), ухудшение качества их вод в значительной степени зависят от внешней биогенной нагрузки со стороны водосбора. Необходимым условием создания системы охраны и рационального использования водного объекта, а также управления его ресурсами является наличие математической модели, связывающей нагрузку от различных источников на водосбор с нагрузкой на водоем. Отсутствие такой модели делает практически невозможным решение задачи по научно-обоснованному выбору путей снижения нагрузки за счет изменений интенсивности каких-либо источников загрязнения, а также достижения заданных характеристик качества воды в водоеме и заданного экологического статуса.

Внешняя нагрузка на водный объект — количество вещества, поступившего в водоем за рассматриваемый интервал времени и, возможно, пересчитанное на единицу площади акватории или объем водной массы. Нагрузка является постоянно действующим фактором, определяющим качество воды в водоеме, влияющим на химический состав донных отложений и гидробиологические процессы. Для решения

задач, связанных с оценкой и прогнозом изменения биогенной нагрузки на водоемы, могут использоваться модели следующих основных разновидностей: детерминированные, стохастические и детерминировано-стохастические. Детерминированные модели, наиболее распространенные в настоящее время [3, 5], основаны на физически обоснованном описании основных изучаемых процессов и определяют однозначную связь между входом и выходом модели. Стохастические (вероятностные) модели учитывают вероятностную структуру процессов. В этом случае входные величины и некоторые параметры модели представляются параметрами распределения плотности вероятности. Одним из перспективных направления моделирования в рассматриваемой области является создание и развитие детерминированно-стохастических (ДС) моделей, объединяющих возможности как детерминированных, так и стохастических моделей.

Целью исследований, результаты которых приведены в настоящей статье, являлось:

– построение ДС модели формирования биогенной нагрузки на основе разработанных ранее детерминированных и стохастических компонентов;
– оценка современной биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с водосбора, неконтролируемого существующей сетью мониторинга Росгидромета, и выявление вклада различных источников загрязнения в биогенную нагрузку;
– оценка изменения стока и биогенной нагрузки на водосборе Финского залива под влиянием возможных климатических изменений.

ДС моделирование стока и биогенной нагрузки на водные объекты основано на использовании гидрологической модели, модели биогенной нагрузки и стохастической модели погоды (СМП), которая обеспечивает метеорологическими рядами гидрологическую модель (рис. 1).

Рис. 1. Схема ДС моделирования стока и биогенной нагрузки

В рамках ДС моделирования стока и биогенной нагрузки решаются следующие задачи:

1. Оценка параметров СМП для наблюденных рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков).
2. Имитационное моделирование рядов метеорологических элементов продолжительной длины.
3. Пересчет суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
4. Моделирование месячных (годовых) слоев стока по гидрологической модели.
5. Моделирование годовых значений биогенной нагрузки (фосфор, азот) по модели биогенной нагрузки.
6. Оценка параметров распределения годовых значений биогенной нагрузки — среднего и среднего квадратичного отклонения.

Итогом ДС моделирования в данном случае является набор кривых распределения годовых значений стока и биогенной нагрузки.

Стохастическая модель погоды — СМП

Для оценки возможных изменений параметров распределения гидрологических характеристик разработана и практически реализована стохастическая модель погоды [9]. Модель служит основой для ДС моделирования характеристик стока, обеспечивая поток метеорологической информации на вход различных математических моделей формирования стока.

В основе стохастического моделирования погоды лежит метод Монте-Карло. При моделировании используется гипотеза о функционально-нормальном законе распределения метеорологических величин, которая позволяет использовать хорошо разработанный для нормального закона распределения корреляционный аппарат. При разработке алгоритмов модели также использовалась гипотеза стационарности случайных процессов и однородности и изотропности случайных полей. Моделирование метеорологических элементов осуществляется для назначенных на водосборе расчетных точек или для метеорологических станций. В случае несовпадения расчетных точек с метеостанциями параметры СМП интерполируются по данным соседних метеостанций в расчетные точки.

Структура СМП приведена на рис. 2. На расчетной точке (или метеостанции) определяется факт выпадения осадков на текущие сутки, который зависит от ситуации на соседних расчетных точках (метеостанциях) и наличия либо отсутствия осадков в минувший день на данной расчетной точке. В случае, если осадки есть, моделируется слой осадков с учетом слоя на соседних расчетных точках.

Следующим этапом моделирования является определение суточной температуры воздуха и суточной относительной влажности воздуха. Если осадки на данной расчетной точке имели место, то при моделировании указанных метеорологических элементов используются параметры, полученные для дней с осадками и для дней без осадков. При моделировании температуры воздуха и относительной влажности воздуха учитывается временная, пространственная и пространственно-временная корреляция.

Моделирование завершается пересчетом относительной влажности воздуха в дефицит влажности воздуха.

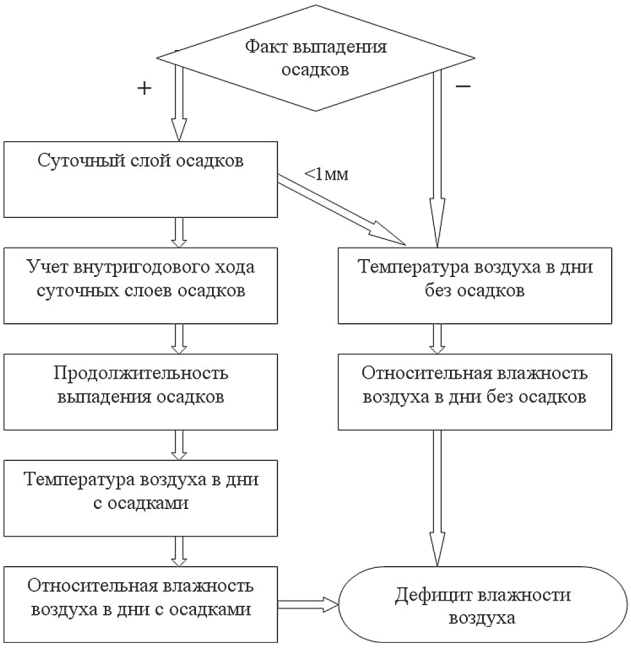

Рис. 2. Схема СМП

Модель формирования стока — ILHM

Гидрологическая модель формирования стока с водосбора ILHM (Institute of Limnology Hydrological Model) разработана в Институте озероведения РАН [8, 3] и предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, определяются в зависимости от озерности, т.е. доли площади водоемов в общей площади водосбора. В модели также предусмотрен расчет глубины водоема, принимающего сток с водосбора в результате решения уравнения водного баланса в предположении равенства значений испарения с водной поверхности и испаряемости.

Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в северо-западном регионе России (водосборы рек Тигода, Лижма, Сяньга, Олонка, Сунна, Шуя, Оять, Сясь, Вуокса, Свирь, Великая, Нева) [8, 7] и Финляндии (водосборы рек Мустайоки и Харайоки) [4]. В настоящее время модель ILHM успешно применяется для решения задач оценки воздействия климатических изменений на сток рек северо-запада РФ, а также в качестве основы для расчетов выноса биогенных веществ с водосборов. Схема модели представлена на рис. 3.

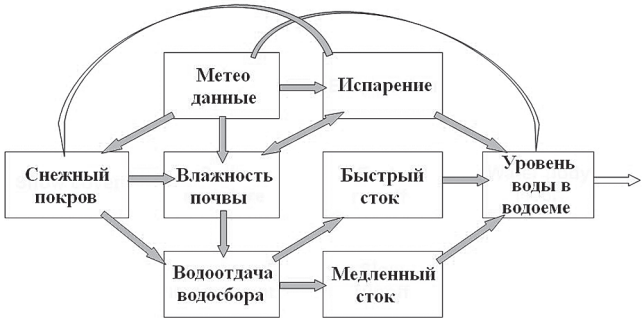

Рис. 3. Схема модели ILHM, описывающей формирование стока на водосборе и динамику уровня водоема

Модель биогенной нагрузки — ILLM

Модель формирования биогенной нагрузки на водные объекты (ILLM — Institute of Limnology Load Model) разработана на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса биогенных веществ с водосборных территорий, поступления биогенных веществ в водоемы [3, 5], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [12]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой биогенной нагрузки, сформированной точечными и рассредоточенными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений. Модель ориентирована на существующие возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, а также структур государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах РФ.

На рис. 4 приведена общая структура усовершенствованной математической модели выноса общего фосфора ($P_{общ}$) и общего азота ($N_{общ}$) с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания биогенных веществ водосбором и гидрографической сетью. Конечным итогом моделирования является количественная оценка биогенной нагрузки на водоем со стороны водосбора и отдельных ее составляющих.

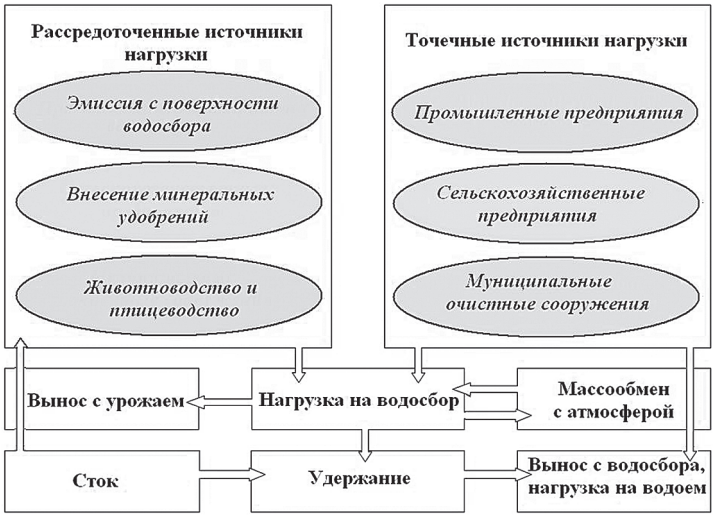

Рис. 4. Схема модели ILLM, описывающей вынос биогенных веществ с водосбора и формирование внешней биогенной нагрузки на водоемы

Для определения гидрологических характеристик водосбора (слоя стока, расхода воды) заданной вероятности превышения могут быть использованы их аналитические кривые распределения, например, трехпараметрическое гамма-распределение, построенные по данным многолетних наблюдений на реках исследуемого региона. Альтернативным способом определения гидрологических характеристик, влияющих на формирование биогенной нагрузки на водные объекты, является использование гидрологической модели (например, ILHM, описанной выше), позволяющей рассчитывать слой стока и расходы воды в зависимости от конкретных гидрометеорологических параметров.

Модель прошла верификацию на ряде объектов, расположенных в Северо-Западном регионе России на водосборах рек Великая, Луга, Мга, Ижора, Славянка [6]. По результатам выполнения проекта EU BaltHazAR II компонент 2.2 «Создание потенциала в рамках экологического мониторинга для получения данных загрязнения из различных источников, например, для HELCOM PLCs» (2012) сделан вывод о том, что «модель ILLM может быть использована для приближенной оценки биогенной нагрузки на Балтийское море с неизученных и малоизученных водосборов России».

Расчет биогенной нагрузки на Финский залив с Российской части водосбора

Финский залив — одна из наиболее эвтрофированных акваторий Балтийского моря. На долю Российской Федерации в 1997–2003 гг. приходилось > 3/4 *P* и > 2/3 *N*, поступающих с водосбора в Финский зал. [11] В ноябре 2007 г. на сессии Хельсинкской комиссии ХЕЛКОМ принят План действий по Балтийскому морю ПДБМ [13], который представляет собой долговременную стратегию оздоровления Балтийского моря. Для выполнения рекомендаций ПДБМ необходимо иметь научнообоснованную

оценку биогенной нагрузки на Финский залив как на настоящий момент, так и на перспективу. Расчеты с использованием ДС моделирования выполнялись в первую очередь для частного водосбора Финского залива (рис. 5), вынос биогенных веществ с которого не контролируется в рамках государственного мониторинга (Германова, Фрумин, 2012). Результаты расчетов биогенной нагрузки на Финский залив с его частного водосбора, выполненных ранее по детерминистической модели, представлены в работах [2, 6].

Рис. 5. Схема частного водосбора Финского залива,
не охваченного сетью наблюдений мониторинга Росгидромета

Оценка параметров СМП

Оценка параметров СМП проводилась на основании данных наблюдений за метеорологическими элементами на болотной станции ГГИ Ламмин-Суо (Ленинградская область) за период 1983–2010 гг. На рис. 6–11 приведены аппроксимации годового хода и кривые распределения вероятностей некоторых метеорологических элементов. Коэффициент корреляции между смежными членами ряда нормированных значений температуры воздуха составил 0,7.

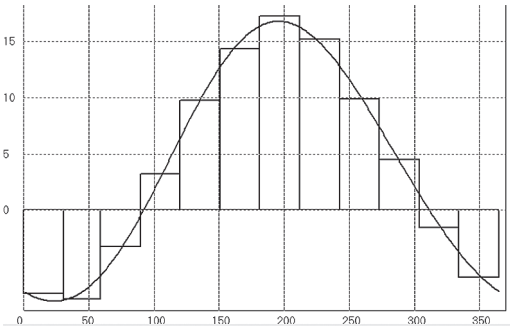

Рис. 6. Аппроксимация годового хода среднемесячной температуры

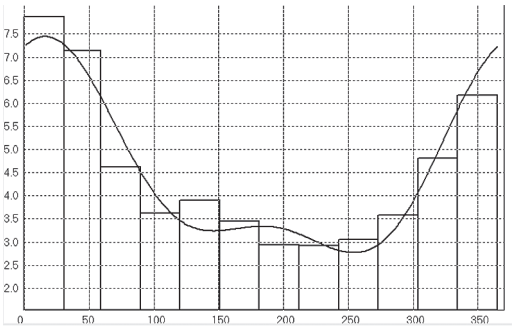

Рис. 7. Аппроксимация годового хода среднего квадратичного отклонения температуры воздуха

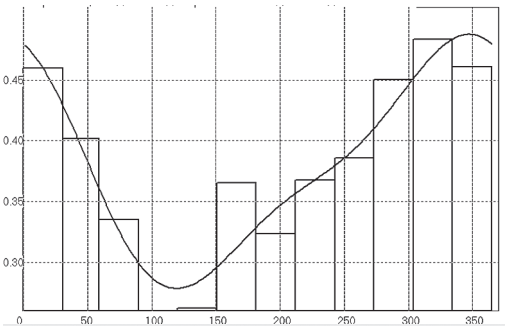

Рис. 8. Аппроксимация годового хода вероятности выпадения осадков

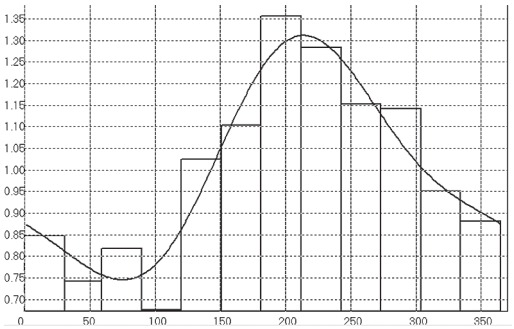

Рис. 9. Аппроксимация годового хода средней относительной величины выпавших осадков

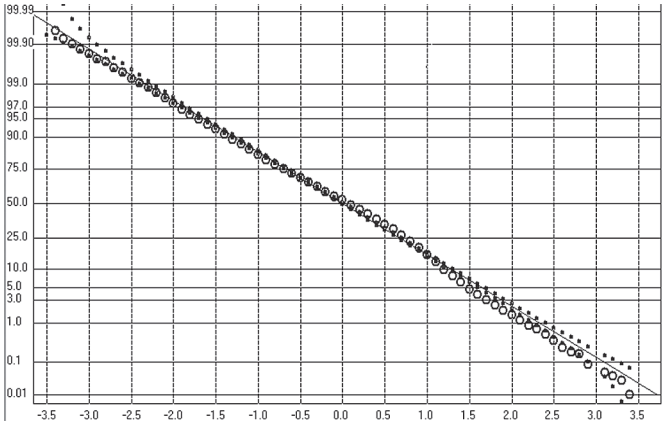

Рис. 10. Кривая распределения вероятностей нормированных значений температуры воздуха

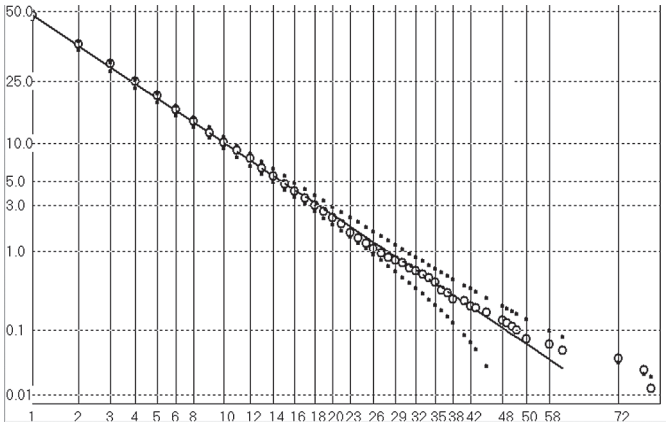

Рис. 11. Кривая распределения вероятностей нормированных и нормализованных слоев осадков без условий

Моделирование рядов метеорологических элементов, годовых слоев стока и биогенной нагрузки

На основании полученных параметров СМП сгенерированы ряды суточных значений метеорологических элементов (температуры воздуха и слоев осадков) продолжительностью 100 лет. По гидрологической модели были рассчитаны слои годового стока по реальной метеорологии и сгенерированным метеорологическим рядам. На рис. 12 приведены кривые распределения годовых слоев стока для частного водосбора Финского залива, а в табл. 1 — параметры распределения годовых слоев стока, полученных по реальным и сгенерированным метеорологическим рядам.

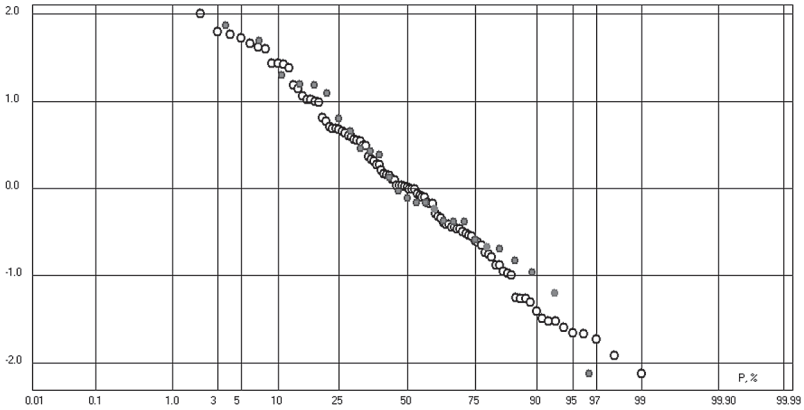

Рис. 12. Кривые распределения годовых слоев стока для частного водосбора Финского залива для реальной метеорологии (•) и сгенерированным метеорологическим рядам (о)

Таблица 1

Параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока, мм год$^{-1}$

Стоки	Среднее	Среднее квадратичное отклонение
Слои стока по реальным метеорологическим рядам	300	60
Слои стока по сгенерированным метеорологическим рядам	304	58

Как видно из табл. 1, параметры распределения годового стока, рассчитанного по сгенерированным метеорологическим рядам, хорошо соответствуют параметрам распределения годового стока, вычисленного по наблюденной метеорологии. Таким образом, полученные по СМП метеорологические ряды могут служить основой для уточнения параметров распределения значений биогенной нагрузки, прежде всего, при недостаточности данных наблюдений за стоком и оценки параметров распределения при изменении условий формирования стока на водосборе.

В табл. 2 представлены результаты ДС моделирования стока и биогенной нагрузки на Финский залив с частного водосбора, рассчитанные по данным об интенсивности источников поступления биогенных веществ в 2010–2012 гг. Из приведенных данных следует, что существенное увеличение нагрузки приходится на многоводный период, что объясняется прямой связью величин биогенной нагрузки и стока.

Таблица 2

Параметры распределения годовых слоев стока и биогенной нагрузки, рассчитанные по фактическим метеорологическим параметрам (среднее – $\overline{X}$ среднее квадратичное отклонение — σ и значения функции различной обеспеченности)

	$\overline{X}$	σ	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
Слои стока, мм год$^{-1}$	304	58,0	439	400	343	265	208	169
Нагрузка $P_{общ}$, т год$^{-1}$	185	5,835	198	194	192	189	181	177
Нагрузка $N_{общ}$, т год$^{-1}$	2296	111	2554	2478	2437	2370	2222	2154

Прогноз изменения стока и биогенной нагрузки на водосборе Финского залива под влиянием возможных климатических изменений

Основой прогноза годового стока и годовых значений биогенной нагрузки послужили сценарии изменения климата, представленные на сайте ФГБУ Институт глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН (http://climatechange.igce.ru/). В качестве исходного сценария приняты расчеты прогнозной климатической модели CCCma (сценарий A2a) для северо-запада России, согласно которым в рассматриваемом регионе к 2080 г. ожидается увеличение среднегодовой температуры на 2°С и увеличение суточного слоя осадков на 1 мм (т.е. 365 мм год$^{-1}$, что крайне маловероятно).

На рис. 13 приведены рассчитанные годовые слои стока по сгенерированным метеорологическим рядам с прогнозными и фактическими параметрами. Длина сгенерированного ряда метеорологических элементов составила 100 лет.

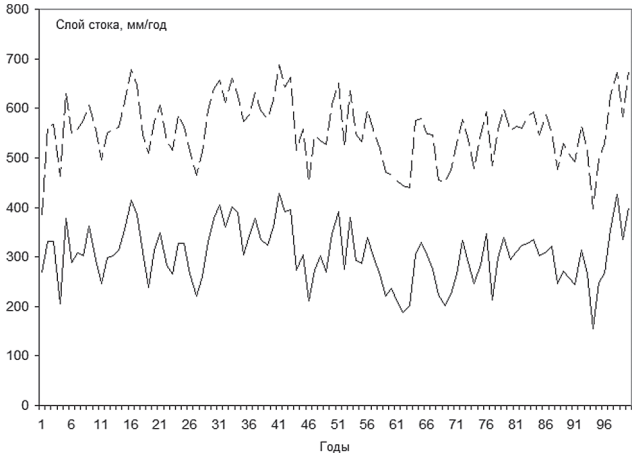

Рис. 13. Рассчитанные годовые слои стока по сгенерированным метеорологическим рядам с прогнозными на 2080 г. (– – –) и фактическими (——) параметрами

В табл. 3 приведены параметры распределения рассчитанных годовых слоев стока и значений биогенной нагрузки при однообразной хозяйственной деятельности на водосборе по сгенерированным метеорологическим рядам с прогнозными значениями параметров.

Таблица 3

Параметры распределения годовых слоев стока и биогенной нагрузки $N_{общ}$, рассчитанные по прогнозным метеорологическим параметрам на 2080 г.

	$\overline{X}$	σ	$X_{1\,\%}$	$X_{5\,\%}$	$X_{25\,\%}$	$X_{75\,\%}$	$X_{95\,\%}$	$X_{99\,\%}$
Слои стока, мм год$^{-1}$	556	63.5	704	661	599	513	451	408
Нагрузка $P_{общ}$, т год$^{-1}$	210	6.379	225	221	214	206	200	195
Нагрузка $N_{общ}$, т год$^{-1}$	2778	121	3061	2978	2860	2697	2578	2496

На рис. 14 представлены кривые распределения вероятностей значений нагрузки $P_{общ}$, полученные с использованием как прогнозных, так и фактических параметров.

По результатам моделирования стока выбранный климатический сценарий можно считать экстремальным, так как его реализация приведет к возрастанию годового стока на 83 % относительно современного значения, что, как уже отмечалось выше, маловероятно. Из сказанного, кстати, следует, что результаты моделирования стока и выноса примесей могут являться средством оценки «разумности» климатических сценариев.

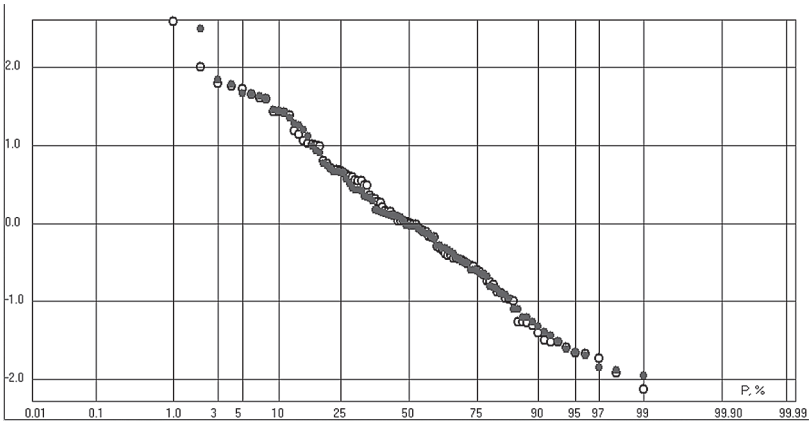

Рис. 14. Кривые распределения нормированных значений $P_{общ}$ по сгенерированным метеорологическим рядам с прогнозными на 2080 г. (•) и фактическими (о) параметрами

Рассчитанное возрастание биогенной нагрузки на Финский залив с Российской части частного водосбора не столь существенно по сравнению стоковыми характеристиками. С увеличением среднегодовой температуры воздуха и суточных слоев осадков к 2080 г. среднее и среднее квадратичное отклонение годовых значений нагрузки $P_{общ}$ увеличатся соответственно на 14 и 1 %, $N_{общ}$ — на 22 и 1 % относительно современных значений.

Очевидно, что хозяйственная деятельность на водосборе, формирующая поступление биогенных веществ в водный объект, должна регламентироваться в зависимости от водности года. Маловодному периоду соответствует годовой сток обеспеченностью 75 % и ниже, многоводному периоду — 25 % и выше. Отсутствие или недостаток объективных гидрометрических наблюдений на больших водосборах затрудняет оценку характеристик стока и, как следствие, оценку биогенной нагрузки на водный объект. Однако методы ДС моделирования позволяют оценить значения стока и биогенной нагрузки необходимой обеспеченности.

Заключение

В ходе проведения выполненных работ получены следующие основные результаты.

1. На основе разработанных и ранее апробированных компонентов сформирована ДС модель стока с водосбора и биогенной нагрузки на водные объекты.
2. В результате проведенного ДС моделирования выполнена оценка параметров функции распределения значений нагрузки $P_{общ}$ и $N_{общ}$ на Финский залив с Российского частного водосбора, не контролируемого системой мониторинга Росгидромета.
3. Показана возможность использования результатов ДС моделирования в качестве индикатора «разумности» климатических сценариев.

Перспективы развития ДС моделирования в области изучения процессов стока, выноса примесей с водосбора и формирования внешней нагрузки на водоемы состоят, прежде всего, в совершенствовании методов детерминированной оценки выноса примесей с водосбора и в русловой сети. Прогресс в этом вопросе зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натурных исследований с целью уточнения параметров модели. Перспективы практического использования ДС заключаются в возможности планирования хозяйственной деятельности на водосборе в соответствии с водностью, а также с учетом изменений условий формирования стока, отсутствия или недостатка данных гидрометрических наблюдений.

Литература

1. *Германова А.В., Фрумин Г.Т.* Поступление биогенных элементов в Балтийское море со стоком трансграничных рек. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 24, с. 100–106.
2. *Кондратьев С.А.* Оценка биогенной нагрузки на Финский залив Балтийского моря с российской части водосбора. // Водные ресурсы, 2011, т. 38, № 1, с. 56–64.
3. *Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб.: Наука, 2007. – 255 с.
4. *Кондратьев С.А., Арвола Л., Хакала И., Алябина Г.А., Маркова Е.Г.* Оценка стока воды, выноса фосфора и органического вещества с малых водосборов Северо запада России и Финляндии (по данным математического моделирования). // Известия Русского Географического Общества, 2003, т. 135, вып. 6, с. 29–36.
5. *Кондратьев С.А., Голосов С.Д, Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю.* Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). — СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2010. – 116 с.
6. *Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г.* Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты. // Региональная экология, 2011, 3–4, с. 50–59.
7. *Кондратьев С.А., Назарова Л.Е., Бовыкин И.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г.* Водный режим водосбора Онежского озера под воздействием изменений климата. // Изв. РГО, 2008, т. 140(3), с. 21–26.
8. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера). // Тр. XII съезда РГО, 2005, т. 6, с. 99–104.
9. *Шмакова М.В.* Стохастическая Модель Погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования характеристик стока: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. Спец. 11.00.07 / Гос. гидрол. ин-т. — СПб., 2000. — 25 с.
10. BaltHazAR II project. Component 2.2: Building capacity within environmental monitoring to produce pollution load data from different sources for e.g. HELCOM pollution load compilations.Testing the nutrient load model for the Luga river. — SYKE, Helsinki, Finland, 2012. – 29 p.
11. Eutrophication in the Baltic Sea. // Baltic Sea Environment Proceedings, No 115B. – Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2009. – 148 p.
12. Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). – HELCOM Publ., Helsinki, Finland, 2005. – 80 p.
13. HELCOM Baltic Sea Action Plan. – HELCOM Publ., Helsinki, Finland, 2007. – 103 p.

В.А. Жигульский, В.Ф. Шуйский, Н.С. Царькова, Н.А. Соловей, Е.Ю. Максимова

РЕАКЦИЯ МАКРОЗООБЕНТОСА ВОДОТОКОВ БАССЕЙНА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА НА МНОГОФАКТОРНЫЕ АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

V. Zhigulsky, V. Shuisky, N. Tsarkova, N.A. Solovey, E.J. Maximova

RESPONSE OF A WATERWAYS MACROZOOBENTHOS TO MULTIFACTOR ANTHROOGENIC IMPACT IN THE EASTERN PART OF GULF OF FINLAND

Даётся описание количественного метода оценки и нормирования сложных (многофакторных) воздействий на экосистемы рек. Предлагаемый метод использует выявленные общие закономерности реакции лучшего биоиндикатора гидроэкосистем — сообществ макрозообентоса — на многокомпонентную внешнюю нагрузку, оцениваемую оригинальным изоболическим показателем. Разработки основаны и апробированы на представительных результатах многолетних гидроэкологических исследований, выполненных авторским коллективом.

Ключевые слова: макрозообентос, многофакторное антропогенное воздействие, гидроэкосистема.

The description of evaluation and standard-setting quantitative method of complex (multifactor) impacts on rivers ecosystems is given. The suggested method uses the revealed general laws of the best hydroecosystem bioindicator reaction — macrozoobenthocoenoses — to multicomponent external impact, which is estimated by the original isobolic index. The present techniques and data are based on representative long-term hydroecological research results executed by the group of authors.

Key words: macrozoobenthos, multifactor anthroogenic impact, hydroecosystem.

Введение

Количественная оценка многофакторных (или «комбинированных», следуя токсикологической терминологии) антропогенных воздействий на экосистемы является одной из наиболее актуальных задач современной экологии. Для решения этой задачи наиболее перспективны методы биоиндикации. Одним из лучших биоиндикаторов качества водной среды и воздействий на гидроэкосистемы служат сообщества донных макробеспозвоночных (макрозообентос). По сравнению с другими сообществами гидробионтов, характеристики макрозообентоса наиболее стабильны в пространстве и времени. Поэтому именно он наиболее четко отражает не только общее состояние гидроэкосистемы, но и её локальные особенности в градиенте воздействия [5].

Нами разработан и широко апробирован метод биоиндикации, позволяющий количественно оценивать и нормировать комбинированные антропогенные воздействия на отдельные сообщества и на экосистемы в целом [2, 5]. В настоящей работе представляются некоторые результаты использования данного метода для изучения

реакции макрозообентоса малых рек бассейна Восточной части Финского залива на многофакторные воздействия. Для этого использованы результаты многолетних гидроэкологических исследований компании «Эко-Экспресс-Сервис». В целях обеспечения разработки природоохранной документации для множества проектов строительства на территории Ленинградской области компания создала и постоянно пополняет собственную базу гидробиологических данных по областным водотокам. При этом база комплектуется сведениями не только о состоянии кормовой базы рыб в изучающихся водотоках, но и об её реакции на разнообразные антропогенные нагрузки.

Методы

Гидрохимические анализы «первого дня», отбор проб воды и грунта и лабораторный гидрохимический анализ проводились по стандартным методикам (ПНД Ф: 14.1.15-95, 14.1.2.21-95, 14.1.2.22-95; РД: 52.10.243-92, 52.17.262-90, 52.18.191-89, 52.18.575-96, 52.24.364-95–52.24.497-95; и др.). Анализ проб воды и грунта производился: в Аналитическом центре мониторинга окружающей среды Государственного унитарного предприятия по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ГУП «ГОСМЕТ») Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды; в лаборатории гидрогеохимии СПГГИ; в РЦ «Мониторинг Арктики»; в лаборатории экологической токсикологии ГосНИОРХ. В пробах определялись 23–59 гидрохимических характеристик (включая поллютанты, специфические для изучаемых источников антропогенного воздействия).

Сбор и обработка проб макрозообентоса проводились по стандартным методикам [3, 4, 6]. На участках рек с мягкими грунтами пробы отбирались дночерпателем ТД-83-1016-40 (с площадью захвата 0,025 м2), на участках с твердыми грунтами — количественной рамкой типа «Surber» (площадью 0,05 м^2, с сетью из газа № 23), при необходимости — водолазным способом (с применением акваланга АВМ7С). Результаты обработки проб зообентоса, сведения о составе воды и иные характеристики условий среды заносились в электронные таблицы MS Excel и затем в единую базу данных под управлением СУБД MS Access. При статистической обработке и математическом анализе данных использовался также пакет программ Statistica (5,0; 6,0).

Количественная оценка и нормирование многофакторных антропогенных воздействий на макрозообентос, используемый как биоиндикатор состояния водной экосистемы, осуществлялись с использованием изоболического метода. Изоболой называется совокупность всех сочетаний значений взаимодействующих факторов, при которых биосистема испытывает одинаковый уровень воздействия (от гр. «ισος» — равное и «βολος» — изменение [1]). Подробное описание метода и примеры его практического применения даются в монографии [5]. Вкратце суть его сводится к следующему:

1. Установлено, что реакцию видового состава макрозообентоса на воздействие целесообразно оценивать не по всем обнаруженным в сообществе видам, а лишь по «характерным», особи которых встречаются в данном сообществе в фоновых условиях (вне воздействия) предсказуемо, с достаточной достоверностью.
2. При этом структура большинства бентосных сообществ оказалась такова, что наиболее удобно и естественно рассматривать как «характерные» те виды, средняя

популяционная плотность которых за период наблюдений отлична от нуля с достоверностью не менее 90 %. При этом в сообществе выделяется устойчивое основное «ядро» характерных видов, присутствие которых достаточно предсказуемо. Соответственно, исчезновение хотя бы одного из «характерных» видов в условиях воздействия может расцениваться как достоверное изменение видового состава данного сообщества, выявленное при доверительном уровне $p = 90$ %.

3. С учётом того, что видовой состав играет важнейшую, «ключевую» роль относительно остальных свойств сообщества и определяет обратимость их изменений, достоверное изменение видового состава сообщества ($p = 90$ %) определяется как потеря последним ***устойчивости к*** данному ***воздействию***. Следовательно, количественной мерой устойчивости сообщества макрозообентоса является предельно допустимый уровень воздействия (ПДУ — максимальный уровень воздействия, при котором устойчивость к нему у сообщества ещё сохраняется).
4. Такой подход позволяет описывать устойчивость сообщества к многофакторному воздействию формулой:

$$\sum_{i=1}^{n}\left[\left(X_{ij}-X_{i\ opt}\right)\times\left(X_{i\ tol}-X_{i\ opt}\right)^{-1}\right]^{Z_i}=1, \qquad (1)$$

где X_{ij} — j-е значение i-го фактора n-факторного воздействия; $X_{i\ opt}$ и $X_{i\ tol}$ — пороговое и предельно допустимое значение i-го фактора; Z_i — показатель взаимодействия i-го фактора с остальными (если оно сильнее аддитивного, $0 < Z < 1$; если слабее — $1 < Z$; если аддитивно — $Z = 1$). Значения параметров уравнения (1) определяются эмпирически в ходе целевого поиска ситуаций потери устойчивости к изучаемому воздействию на конкретном водотоке или, при невозможности их установления, ориентировочно принимаются равными значениям параметров этих же факторов на аналогичных водных объектах, испытывающих сходные воздействия [5].

5. Любой уровень воздействия при этом может количественно оцениваться кратностью превышения устойчивости. Мерой многофакторного воздействия является показатель Y, значение которого для некоторой j-й ситуации рассчитывается по формуле:

$$\sum_{i=1}^{n}\left[\left(X_{ij}-X_{i\ opt}\right)\times\left(X_{i\ tol}-X_{i\ opt}\right)^{-1}\times\left(Y_j\right)^{-1}\right]^{Z_i}=1. \qquad (2)$$

Показатель Y является изоболическим, поскольку детерминирует изоболу — определяет все те сочетания значений взаимодействующих факторов, которые вызывают равное изменение сообщества. Соответственно, значение Y показывает, во сколько раз данное многофакторное воздействие превысило свой предельно допустимый уровень (кратность превышения ПДУ).

Результаты

В настоящее время данные о состоянии кормовой базы рыб и рыбном населении в период с 1994 по 2010 г. получены для более чем 100 водотоков, протекающих почти

во всех районах Ленинградской области (рис. 1). Исследовались такие реки (с притоками), как Нева, Луга, Плюсса, Волхов, Сясь, Свирь, Вуокса, а также множество других малых рек и ручьёв.

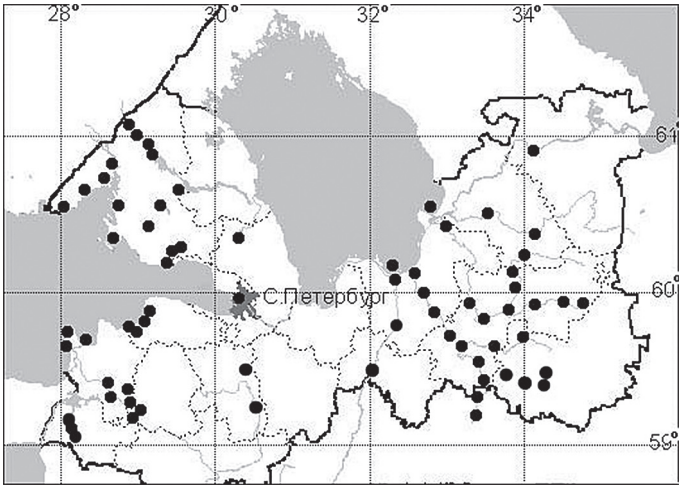

Рис. 1. Изучавшиеся водотоки Ленинградской области

Наряду с влиянием на экосистемы водотоков транспортного и промышленного строительства, изучались также следующие виды антропогенных воздействий: действие эксплуатируемых объектов горно-металлургического комплекса (ООО «ПГ Фосфорит», ОАО «Глинозём» в г. Пикалёво, ОАО «Бокситогорский глинозём», ЗАО «Каменногорское карьероуправление», ОАО «Ленинградсланец»); влияние эксплуатируемых предприятий целлюлозно-бумажной промышленности (Светогорский и Сясьский ЦБК); термофикация в сочетании с загрязнением; влияние объектов нефтегазового комплекса; влияние сельскохозяйственных объектов; влияние населённых пунктов; последствия молевого лесосплава; антропогенное эвтрофирование; интенсивное рыбоводство; мероприятия по рекультивации рек с нарушенной русловой структурой и др. Наиболее представительны сведения о речном макрозообентосе и дрифте (протоколы обработки более 6 тыс. проб).

Использование изоболического показателя Y позволяет выявить реакцию изученных сообществ речного макрозообентоса на многофакторные воздействия различного происхождения и разной степени сложности. На рис. 2 представлены значения некоторых характеристик макрозообентоса в условиях различных антропогенных воздействий, нормированные относительно своих фоновых значений (определённых в данном водотоке в то же время вне изучаемого воздействия в таком же биотопе). Это количество видов в сообществе (S), индекс видового разнообразия по Шеннону-Уиверу (H, бит/экз.), биомасса (B, г/м^2) и средняя масса особи (W, мг). При нормировке относительно фоновых значений показатели приобретают вид S/S_o, H/H_o, B/B_o и W/W_o соответственно.

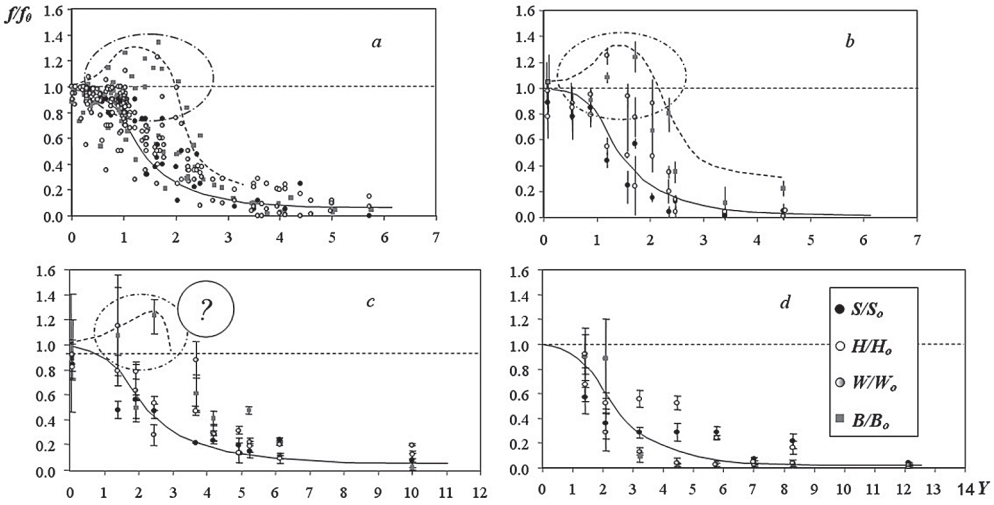

Рис. 2. Реакция макрозообентоса некоторых рек бассейна Восточной части Финского залива на антропогенные воздействия: эвтрофирование без токсификации (*a*, *b*), со слабой (*c*) и со значительной (*d*) токсификацией.
Реки: *a* — притоки р. Свири; *b* — р. Чёрная с притоками; *c* — притоки р. Сясь; *d* — р. Луга.
Характеристики: S/S_o — видовое богатство; H/H_o — видовое разнообразие; B/B_o — биомасса; W/W_o — средняя масса особи (значения характеристик нормированы относительно фоновых).
Штрих-пунктиром выделен эффект стимуляции биомассы и средней массы сообществ при эвтрофировании без токсификации (в ситуациях: *a*, *b* и, менее выраженно, *c*)

Обсуждение

Практика показывает, что формы реакции характеристик речного макрозообентоса от уровня многофакторного воздействия довольно разнообразны (примеры на рис. 2), однако могут быть вполне естественно типизированы. По мере равномерного усиления воздействия (и, соответственно, увеличения значения Y) значения большинства количественных характеристик макрозообентоса закономерно уменьшаются. Пока исходный видовой состав сообщества и определяемая им упругая устойчивость к воздействию сохраняются ($Y < 1$), значения количественных характеристик макрозообентоса уменьшаются несущественно (обычно — не более чем на 15 % от своих фоновых значений).

Потеря упругой устойчивости сообщества к воздействию обычно проявляется в исчезновении из биотопа особей не какого-либо одного, а сразу многих стенобионтных видов. Их совместное исчезновение вызывает скачкообразное уменьшение большинства количественных показателей сообщества (на 30–60 % от фоновых значений, чаще всего — на 40–50 %). Резкое изменение видового состава и количественных структурно-функциональных характеристик, происходящие при потере упругой устойчивости сообщества макрозообентоса, имеет бифуркационный характер и может быть вполне обоснованно определено как ***первая катастрофа*** сообщества.

Дальнейшая реакция характеристик сообщества, уже утратившего упругость, на усиление воздействия сверх ПДУ ($Y > 1$) более разнообразна. Могут быть выделены следующие три основные типа реакции сообществ на возрастание многофакторного воздействия, выражаемого изоболическим показателем Y (рис. 3).

Тип I. После первой катастрофы дальнейшее усиление воздействия вызывает плавное, постепенное уменьшение значений характеристик сообщества, асимптотически стремящихся к нулю или иному минимальному значению (без второй катастрофы). График такой функции отклика представляет собой монотонную нисходящую *S*-образную кривую (рис. 3, кривая *I*; практический пример — на рис. 2*d*).

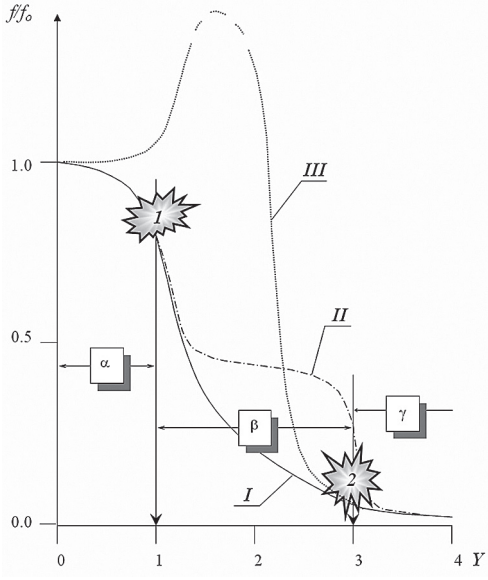

Рис. 3. Типы реакции характеристик макрозообентоса на многофакторное антропогенное воздействие. Обозначения в тексте

Тип II. После первой катастрофы дальнейшее усиление воздействия до определённого уровня не вызывает существенных изменений значений функции. Однако при более высоком уровне воздействия повторно происходит резкое обеднение видового состава сообщества и связанное с этим скачкообразное уменьшение значений его характеристик, то есть происходит ***вторая катастрофа*** сообществ макрозообентоса. Вторая катастрофа некоторых донных сообществ наблюдалась при уровне воздействия, примерно втрое превосходящем ПДУ ($Y \approx 3$) [5]. График такой функции отклика представляет собой монотонную нисходящую двухступенчатую кривую (рис. 3, кривая *II*).

Степень выраженности второй катастрофы в разных ситуациях может существенно варьировать. По целому ряду объективных причин ситуацию второй катастрофы в натурных условиях обнаружить намного сложнее, чем первой. Однако на некоторых

реках, экосистемы которых претерпевают антропогенные сукцессии, она выражена весьма отчётливо [5]. Пока остаётся неясным, является ли вторая катастрофа в градиенте воздействия столь же обязательной, характерной и отчётливо выраженной, как и первая.

Тип III. Усиление воздействия сначала, до некоторого уровня ($Y \approx 2$), вызывает увеличение значений некоторых характеристик сообщества, а затем, превысив этот уровень, наоборот, определяет их довольно резкое уменьшение. Иногда так реагируют на эвтрофирование, не связанное с токсификацией, количественные характеристики обилия макрозообентоса (биомасса, плотность, скорость образования продукции). Так, например, на твёрдых субстратах умеренное эвтрофирование стимулирует увеличение указанных характеристик донных сообществ за счёт снятия трофического лимитирования и экспансии в них эврибионтных бентонтов [5]. В этом случае график функции отклика представляет собой немонотонную куполообразную кривую (рис. 3, кривая *III*; примеры — на рис. 2*a*,*b*). На заиленных плёсах этот эффект не наблюдается.

В зависимости от свойств биотопа и от характера оказываемого воздействия этот стимулирующий эффект может быть выражен в различной степени. При техногенном эвтрофировании водного объекта, отягощённом токсификацией, описанный стимулирующий эффект может проявляться слабо, нечётко (как, например, при воздействии ОАО «Бокситогорский глинозём» на притоки р. Сяси: рис. 3*c*) или же вообще отсутствовать (как, например, это наблюдается в зоне воздействия ООО «ПГ Фосфорит» на р. Лугу: рис. 3*d*).

Таким образом, между выделенными основными тремя типами функций отклика характеристик макрозообентоса на антропогенное воздействие нет чётких границ и возможны любые промежуточные, переходные ситуации. Выделяются три основные градации многофакторного воздействия: α — незначительное ($Y < 1$); β — значительное (при $1 < Y < 3$); γ — сильное (при $Y > 3$).

Многочисленные сведения о количественных характеристиках сообществ гидробионтов и о закономерностях их реакции на различные антропогенные воздействия используются в ООО «Эко-Экспресс-Сервис» для обеспечения объективной оценки ожидаемого ущерба кормовой базе рыб при проектируемых воздействиях на экосистемы водотоков Ленинградской области.

Выводы

1. На примере рек Ленинградской области рассмотрены некоторые особенности реакции макрозообентоса как наиболее представительного биоиндикатора состояния гидроэкосистем на антропогенное воздействие. Показано, что многофакторное антропогенное воздействие на макрозообентос может быть адекватно оценено предложенным изоболическим показателем (Y). Структура показателя такова, что каждое значение Y соответствует всем тем (и только тем) сочетаниям значений взаимодействующих факторов, на которые биоиндикатор реагирует определённым, равным изменением. Поэтому использование изоболического показателя позволило проанализировать, обобщить, формализовать и использовать основные количественные закономерности реакции биоиндикатора — сообществ макрозообентоса на различные техногенные воздействия.

2. Предложена классификация основных типов реакции характеристик макрозообентоса на возрастающее антропогенное воздействие. Три выделенных типа реакции достаточно условны и могут иметь любые промежуточные формы. Если техногенная сукцессия водотока происходит по «классическому» сценарию антропогенного эвтрофирования без существенной токсификации, то в биотопах со слабо заиленными, твёрдыми субстратами при умеренных уровнях нагрузки ($Y \approx 1 \div 2$) наблюдается эффект стимуляции некоторых характеристик сообществ (биомасса, средняя масса особи, скорость продуцирования и др.). На мягких грунтах (а при техногенной токсификации вод — на всех субстратах) этот стимулирующий эффект малых воздействий сглажен или не наблюдается. При дальнейшем усилении воздействия ($Y > 2$) значения этих характеристик лимитируются во всех биотопах. Характеристики, зависимые от видового состава (количество характерных видов, индексы разнообразия и др.) монотонно и закономерно асимптотически убывают во всём диапазоне значений $Y > 1$ при любом типе воздействия. Любые воздействия при их уровне $Y > 3$ в любом типе биотопа ведут к деградации сообществ макрозообентоса, количественные характеристики которых не превышают при этом 10–15 % от своих фоновых значений.
3. Выявленные и описанные закономерности реакции макрозообентоса на многофакторные антропогенные воздействия могут быть использованы для оценки, нормирования и прогнозирования комбинированных антропогенных нагрузок на водные экосистемы. В частности, они используются специалистами компании «Эко-Экспресс-Сервис» при разработке природоохранной документации для проектов, связанных с гидростроительством на территории Ленинградской области.

Литература

1. *Власов В.В.* Реакция организма на внешние воздействия: общие закономерности развития и методические проблемы исследования — Иркутск: ИГУ, 1994. — 344 с.
2. *Жигульский В.А., Шуйский В.Ф., Максимова Т.В., Григорьева Ю.Н.* Биоиндикация аэротехногенного загрязнения наземных экосистем выбросами энергетических предприятий (на примере Сланцевского района Ленинградской области). // Современные проблемы биомониторинга и биоиндикации: Сб. мат. VIII Всероссийской научно-практ. конф. с международным участием. — г. Киров, 1–2 дек. 2010 г. — Киров: ООО «Лобань», 2010, т. 1, с. 79–83.
3. *Комулайнен С.Ф., Круглова А.Н., Хренников В.В., Широков В.А.* Методические рекомендации по изучению гидробиологического режима малых рек. — Петрозаводск, 1981. — 41 с.
4. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах: Зообентос и его продукция — Л., 1983, с. 29–46.
5. *Шуйский В.Ф., Максимова Т.В., Петров Д.С.* Изоболический метод оценки и нормирования многофакторных антропогенных воздействий на пресноводные экосистемы по состоянию макрозообентоса. — СПб.: МАНЭБ, 2004. — 304 с.
6. *Slack K.V., Averett R.C. Gresson P.E., Lipsoned R.G.* Methods for collection and analysis of aquatic biological and microbiological samples. // Technique of waterresources of geological Survey, Books, Chapter A–Y, 1973. — 165 p.

А.И. Альхименко, Н.Н. Загрядская, С.Г. Калинин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗВЕСЕЙ ПРИ ДНОУГЛУБЛЕНИИ

A.I. Alkhimenko, N.N. Zagryadskaya, S.G. Kalinin

NUMERICAL SIMULATION OF SUSPENDED PARTICLES UNDER DREDGING OPERATIONS

Статья посвящена численному моделированию распространения мутности при дноуглублении. Показано численное решение задачи в одномерном, двумерном и трехмерном случаях методом переменных направлений.

Ключевые слова: численное моделирование, мутность, дноуглубление.

The numerical simulation of distribution suspended particles under dredging operations is analyzed in this article. The solution of the problem is shown in one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional cases by the method of alternating directions.

Key words: numerical simulation, suspended material, dredging.

Определение распространения мутности (взвеси) при дноуглублении и дампинге (подводном отвале грунта) в водной среде представляет собой сложный процесс, при описании которого необходимо учитывать множество факторов, главным из которых обычно считается механический (перенос движущимися водами). Механический перенос в свою очередь может быть разделен на две составляющих: перенос, обусловленный полем осредненных скоростей течений и перенос, вызванный наличием в поле скорости случайных хаотических составляющих (диффузия).

Основной количественной характеристикой поля примеси в жидкости является концентрация C. С течением времени ее распределение в жидкости меняется. Изменение концентрации происходит также за счет переноса жидкости со скоростью течения и за счет турбулентной диффузии примеси [2, 5, 6].

Турбулентный поток мутности (облака взвешенных частиц грунта) пропорционален градиенту средней концентрации взвеси с коэффициентом пропорциональности, носящим название коэффициента турбулентной диффузии. Осредненное уравнение переноса взвеси для несжимаемого потока в случае пренебрежения молекулярной диффузией приводит к уравнению для концентрации [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(K_{i,j} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right), \qquad (1)$$

где C — осредненная концентрация диффундирующего вещества, в нашем случае — взвеси; $K_{i,j}$ — тензор коэффициентов турбулентной диффузии; U_i — компоненты скорости вдоль координатных осей x_i.

Уравнение (1), носящее название полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии, получило широкое применение при решении различных задач о распространении примесей в водной и воздушной среде.

Для решения уравнения (1) необходимо знать величину коэффициентов $K_{i,j}$. В работах по океанологии обычно пренебрегают недиагональными компонентами тензора $K_{i,j}$ [6] и полагают

$$K_{xy} = K_{yx} = K_{xz} = K_{zx} = K_{yz} = K_{zy} = 0, \quad K_{xx} = K_x, \quad K_{yy} = K_y, \quad K_{zz} = K_z.$$

По вопросу о значениях коэффициентов турбулентной диффузии в океане отсутствует единая точка зрения. Для определения численных значений коэффициентов диффузии проводились опыты в морях, в которых широко использовались красители [1]. На основании анализа диффузионных опытов, сделан вывод о зависимости коэффициентов K_x, K_y от масштаба диффузионного процесса и необходимости использования различных уравнений диффузии (с постоянными коэффициентами, с коэффициентами, связанными с масштабом явления линейной зависимостью или законом «четырех третей») для описания процессов турбулентного обмена разного масштаба. По исследованиям Озмидова [6], этот коэффициент для широкого диапазона масштабов (порядка 10–10000 км) с достаточной степенью точности можно полагать равным $PL^*/2$, где P — «скорость диффузии», а L^* — масштаб явления. При средних значениях $P = 1{,}5 \cdot 10{-}2$ м/с, полагаем $K_x = K_y = K_p = 0{,}75 \cdot 10{-}2L^*$ и считаем эти коэффициенты постоянными в рассматриваемом диапазоне времени. Значение L^* принимается в каждом конкретном случае в зависимости от масштаба рассматриваемого явления. В ряде случаев при решении задачи о распространении загрязнения можно пренебречь турбулентным обменом в вертикальной плоскости. На основании многочисленных исследований можно говорить о возможности описания процесса диффузии в гидросфере акваторий при решении большинства практических задач уравнением с постоянными коэффициентами, полагая $K_x = \text{const}$, $K_y = \text{const}$, $K_z = \text{const}$, что приводит к уравнению:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + w\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial C}{\partial z}\right), \qquad (2)$$

где $u = u(x, y, z)$, $v = v(x, y, z)$, $w = w(x, y, z)$ — компоненты осредненного поля скоростей течения вдоль декартовых осей x, y, z.

Система координат выбрана так, чтобы плоскость $z = 0$ совпадала со свободной невозмущенной поверхностью, ось z направлена вниз.

Левая часть уравнения за исключением $\partial C/\partial t$ представляет конвективный перенос массы, связанный с полем скорости жидкости, тогда как правая часть представляет неконвективный турбулентный перенос массы. Уравнение (2) описывает процессы диффузии и переноса для консервативных веществ без учета источника. Решение уравнения (2) проводится с начальными данными. При этом задается так называемый мгновенный источник загрязнения. Источники могут быть береговые

(при дноуглублении), поверхностные (при дампинге), глубинные (при дноуглублении). Источник взвеси учитывается введением в правую часть уравнения (2) члена $Q(x, y, z, t)$, характеризующего интенсивность источника загрязнения, а именно, количество взвеси, поступающей в единицу времени на единицу объема акватории.

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}+w\frac{\partial C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)+Q(x,y,z,t). \quad (3)$$

В случае мутности, распространяющейся по поверхности акватории, уравнение распространения становится двумерным и имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+Q(x,y,t). \quad (4)$$

Типы источников могут быть самыми разнообразными, обычно рассматривают некоторые идеализированные типы.

Непрерывный точечный источник с удельной мощностью $Q\sigma$, действующий в точке (x^*, y^*, z^*), например, при работе дноуглубительных механизмов, описывается формулой:

$$Q(x,y,z,t)=Q\sigma(t)\delta(x-x^*)\delta(y-y^*)\delta(z-z^*),$$

где Q — масса взвеси, поступающая в точку (x^*, y^*, z^*) в единицу σ времени.

В численном счете такой источник моделируется как распределенный по площади одной сеточной ячейки (слагаемым $Q\sigma/\Delta x\Delta y$ в одном узле сетки, соответствующем точке (x^*, y^*)), для двумерного уравнения, и по одному элементарному сеточному объему ячейки (слагаемым $Q\sigma/\Delta x\Delta y\Delta z$ в одном узле сетки, соответствующем точке (x^*, y^*, z^*)).

Мгновенный точечный источник, когда примесь считается вводимой в водную среду в определенный момент времени t^* в точке (x^*, y^*, z^*),например, при разгрузке грунтоотвозящих шаланд. В этом случае

$$Q(x,y,z,t)=Q_\Gamma(t)\delta(t-t^*)\delta(x-x^*)\delta(y-y^*)\delta(z-z^*),$$

где $Q_г$ — масса грунта.

Береговые, поверхностные, донные источники учитываются при постановке граничных условий. Сама же разностная схема для уравнения диффузии (3), (4) не меняется.

Необходимые для решения уравнений диффузии (3), (4) граничные условия ставятся следующим образом. Пусть процесс распространения загрязнений рассматривается в области Ω, соответствующей изучаемой водной акватории. Область Ω имеет твердые границы (дно и береговую черту) и может содержать жидкие границы, через которые она соединяется с другими водными бассейнами.

Условия на границе области Ω могут быть разных типов. Пусть на границе находится источник примеси мощностью q, где q — известная функция, характеризующая количество примеси, поступающей в бассейн в единицу времени с единицы длины границы в двумерном случае, или единицы площади границы в трехмерном. В общем случае задаются смешанные граничные условия вида

$$v_n C = K_n \frac{\partial C}{\partial n} + q, \tag{5}$$

где n — внутренняя нормаль к границе области; V_n — нормальная составляющая скорости жидкости на границе; K_n — коэффициент диффузии в нормальном направлении; q — известная функция мощности источника примеси.

Функция q может характеризовать как источник примеси, так и поглощающие свойства границы (в этом случае $q < 0$), которые зависят от физических свойств диффундирующей примеси (взвеси) и от состава пород, образующих берег и дно водоема. Случай $V_n = 0$ соответствует полностью непроницаемой границе (береговая черта). На открытых участках акватории должна быть задана нормальная составляющая скорости V_n и возможный источник примеси. Если же диффузия примеси рассматривается вдали от границ области, тогда влиянием границ на процесс можно пренебречь, и задача решается с граничными условиями равенства нулю концентрации на бесконечно больших расстояниях от источника: $C|\infty = 0$.

Постановка начальных условий для уравнений (3), (4), если $Q = 0$, заключается в задании распределения концентрации примеси в момент $t = 0$, которое должно быть известно. Как показывают натурные наблюдения [1, 6], распределение концентрации в пятне мутности в начальный момент можно описать законом Гаусса, который отражает убывание концентрации с удалением от эпицентра выброса по экспоненциальному закону. В полярных координатах эта закономерность записывается следующим образом:

$$C(r,0) = C_0 \exp\left\{-r^2 / r_0^2\right\}. \tag{6}$$

где C_0 — начальная (максимальная) концентрация взвеси в точке выброса; r_0 — характерный радиус пятна.

Концентрация примеси в начальный момент времени определяется по формуле (6). Однако на практике обычно известно количество взвеси M и неизвестен характерный радиус пятна r_0. Считая известной начальную концентрацию C_0 в эпицентре, выведем зависимость между M, C_0 и r_0. Полагая вид пятна взвеси в виде круга, можно записать $M = \int_s C ds$, где ds — длина участка дуги окружности в пятне мутности: $ds = 2\pi r dr$, r — текущая полярная координата точки пятна. Учитывая (6), имеем:

$$M = C_0 \int_0^\infty e^{-r^2/r_0^2} \cdot 2\pi r dr = \pi C_0 \int_0^\infty e^{-r^2/r_0^2} dr = \pi C_0 r_0^2 e^{-r^2/r_0^2} \Big|_0^\infty = \pi C_0 r_0^2.$$

С учетом этого начальное распределения концентрации примеси можно записать в виде:

$$C(r,0) = C_0 \exp\left\{-\pi C_0 r^2 / M\right\}.$$

Отсюда очевидно, что для заданной массы M загрязняющего вещества (взвеси) малым значениям r_0 соответствуют большие C_0, что характеризует концентрированный залповый выброс загрязнения.

Таким образом, уравнения (3) и (4) вместе с граничными условиями (5) и начальными условиями типа (6) описывают процесс распространения мутности в рассматриваемой области на этапе турбулентной диффузии. Для решения краевой задачи (3)–(6) необходимо знать структуру течений в исследуемом районе. Скорости течений в морском бассейне могут быть получены на основе натурных, экспериментальных данных или расчетным методом [7].

При условии, что известны составляющие скорости течений и коэффициенты турбулентной диффузии, решение двухмерной краевой задачи (3)–(6) позволяет получить картину распределения концентрации взвеси вследствие ее взаимодействия с морской средой.

Трехмерное уравнение (3) позволяет описать движение так называемой динамически пассивной взвеси. Для описания поведения динамически активной взвеси, то есть обладающей отрицательной или положительной плавучестью в поле силы тяжести, необходимо несколько изменить уравнение (3) и ввести граничные условия на поверхности моря и на дне. Уравнение (3) тогда примет вид [1]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + \left(w + w_c\right)\frac{\partial C}{\partial z} =$$
$$= \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + Q(x,y,z,t), \qquad (7)$$

где w_c — собственная гравитационная вертикальная скорость взвеси.

При решении уравнения (7) необходимо задать также граничные условия на поверхности и на дне моря. На поверхности моря при $z = 0$, при условии отсутствия взаимодействия взвеси с атмосферой, они имеют следующий вид [2]:

а) для динамически активной всплывающей взвеси

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} + w_c C + Q_1 = 0, \qquad (8)$$

б) для динамически активной оседающей взвеси

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} - w_c C + Q_1 = 0, \qquad (9)$$

в) для динамически нейтральной (пассивной) взвеси

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} + Q_1 = 0. \qquad (10)$$

Граничные условия на дне моря при $z = H(x, y)$ должны включать условия взаимодействия взвеси с дном:

а) для всплывающей взвеси

$$K_z \frac{\partial C}{\partial n} - \left(\beta_2 + w_c\right)C + Q_2 = 0, \tag{11}$$

б) для оседающей взвеси

$$K_z \frac{\partial C}{\partial n} - \left(\beta_2 - w_c\right)C + Q_2 = 0, \tag{12}$$

в) для пассивной взвеси

$$K_z \frac{\partial C}{\partial n} - \beta_2 C + Q_2 = 0, \tag{13}$$

где n — нормаль ко дну; Q_1 — соответствует сбросу грунта на поверхности океана при выгрузке шаланд; Q_2 — источник примеси расположен на дне, дноуглубление; β_2 — параметр, определяющий характер взаимодействия загрязняющей взвеси с морским дном. Обычно, параметру β_2 придаются два предельных значения:

а) $\beta_2 = 0$, соответствует полному отражению вынимаемого грунта от морского дна;

б) $\beta_2 \to \infty$, соответствует полному поглощению грунта морским дном.

Решение уравнения (7) с краевыми условиями (5), (8)–(12) позволяет получить картину распространения динамически активной и пассивной взвеси на любом горизонте в случае расположения источников взвесей как на берегах акваторий, так и на дне и на промежуточных глубинах при различных взаимодействиях ее с морским дном.

Существуют многочисленные аналитические решения различных задач диффузии взвеси в простейших условиях (для простых модельных областей и постоянных либо нулевых скоростей течений) [6].

Однако при изучении реальных процессов формирования зон мутности с учетом сложных полей течений и морфометрии бассейна невозможно получить аналитические решения уравнений (3), (7), описывающих распространение взвеси. В инженерной практике используются приближенные аналитические методы решения целого ряда относительно простых задач прогноза качества воды. Но при исследованиях процессов диффузионного переноса в естественных водоемах при переменных граничных условиях эти методы неприменимы.

Нами были рассмотрены выбор метода решения поставленной задачи, а также численные решения задачи в одномерном, двухмерном и трехмерном случаях методом переменных направлений.

Непосредственное решение двухмерного уравнения (4), а тем более трехмерного (7) численным методом приводит к довольно сложной линейной системе разностных уравнений высокого порядка. Трудности, связанные с двухмерной и трехмерной схемами, могут быть преодолены путем расщепления алгоритма решения на два или три полушага (треть шага) по времени, дающих в сумме продвижение на один шаг по времени.

Решение уравнений (4) и (7) осуществлено так называемым методом переменных направлений, или расщепления. Этот метод позволяет на каждом временном шаге сводить сложную задачу математической физики к последовательности простейших одномерных задач. В результате мы приходим к эффективному алгоритму реализации на компьютере, абсолютно устойчивому и обеспечивающему второй порядок аппроксимации решения как по пространственным переменным, так и по времени. При таком подходе интегрирование двухмерного уравнения (4) сводится к последовательному интегрированию уравнений более простой структуры. Основная алгоритмическая идея экономичности метода расщепления состоит в том, что для перехода со слоя tk на слой $tk+1$ надо решать трехточечные разностные уравнения сначала вдоль строк (по оси x-n раз), а потом вдоль столбцов (по оси y-m раз) разностной сетки. Где m и n размерность расчетной сетки вдоль координатных осей X и Y. Шаг по времени делится на два полушага, и одно разностное уравнение заменяется двумя.

В случае трехмерного уравнения (7) объем вычислений значительно возрастает, так как приходится решать двухмерную задачу на каждом слое по вертикали, а также решать одномерное уравнение диффузии в направлении оси $Z(m{\cdot}n)$ раз, при этом шаг по времени делится на 3.

Для решения одномерного уравнения турбулентной диффузии (14) применен эффективный метод исключения — метод прогонки [2]. В результате использования этого удалось отказаться от решения в ряде случаев большой системы линейных алгебраических уравнений, которая становится трехдиагональной, а в дальнейшем достаточно удобно перейти к решению двухмерного (4) и трехмерного уравнений турбулентной диффузии (3) на основе решения того же уравнения в одномерном варианте.

При применении метода прогонки для решения одномерного уравнения турбулентной диффузии произведен учет дрейфа пятна мутности.

Уравнение, описывающее случай поверхностного загрязнения взвесью узкого канала на интервале $[a, b]$, т.е. одномерную задачу, тогда имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u(x)\frac{\partial C}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \tag{14}$$

где $C(x, t)$ — концентрация диффундирующей взвеси; t — время; $u(x)$ — скорость дрейфа; K_x — коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии.

Начальные условия зададим в виде:

$$C(x,0) = C_0 \exp\left\{-\left(x - x_0\right)^2 / r_0^2\right\}, \tag{15}$$

где x_0 — координата центра пятна мутности; r_0 — характерная полуширина загрязнения.

Это гауссовское распределение соответствует распространению мутности от мгновенного источника на стадии турбулентной диффузии спустя некоторое время с момента выброса.

Граничные условия ставятся следующим образом:

$$u_a C + K_x \frac{\partial C}{\partial x} = q \quad \text{при } x = a,$$
$$u_b C + K_x \frac{\partial C}{\partial x} = q \quad \text{при } x = b, \qquad (16)$$

где u_a, u_b — скорости течения на границах интервала $[a, b]$. Скорость течения $u(x)$ считается известной.

В области $\Omega = [a, b]$ введем пространственно-разностную сетку $wh\Delta t = \{(xi,tk)$: $xi = ih$, $0 \leqslant x \leqslant H$, $tk = k\Delta t$, $0 \leqslant t \leqslant T$, $I = 0,1,...,N$, $k = 0,1,...,L$, $h = H/N$, $\Delta t = T/L\}$ с шагами h по x и Δt по t (H — длина интервала $[a, b]$, T — моделируемый промежуток времени).

Будем решать уравнение (14) методом конечных разностей. Для этого заменим область непрерывного изменения аргументов дискретным множеством точек (сеткой) и аппроксимируем на сетке дифференциальное уравнение разностным.

Введем следующие обозначения: $C_i^{(n)} = C(x_i, t_n)$, $u_i = u(x_i)$ — значения функций в узлах сетки; верхний индекс соответствует временному слою, нижний — пространственной координате. При построении конечно — разностного уравнения каждый член уравнения (14) может быть заменен разностными соотношениями различным образом, и возможные комбинации этих способов весьма многочисленны. Мы выбираем так называемую симметричную неявную схему Кранка-Николсона [8]. Она определена на шеститочечном шаблоне. Схема Кранка-Николсона имеет удвоенную точность по шагам по времени за счет того, что ее можно рассматривать как результат последовательного применения двух схем для половинных интервалов по времени, кроме того, эта схема абсолютно устойчива. Конечно-разностная схема уравнения (14) имеет вид:

$$\frac{C_i^{(n+1)} - C_i^{(n)}}{\Delta t} + u_i \frac{C_{i+1}^{(n)} - C_{i-1}^{(n)} + C_{i+1}^{(n+1)} - C_{i-1}^{(n+1)}}{4h} =$$
$$= K_x \frac{C_{i+1}^{(n)} - 2C_i^{(n)} + C_{i-1}^{(n)} + C_{i+1}^{(n+1)} - 2C_i^{(n+1)} + C_{i-1}^{(n+1)}}{2h^2}. \qquad (17)$$

Граничные условия в разностном представлении имеют вид:

$$\begin{cases} u_a \dfrac{C_0^{(n)} + C_0^{(n+1)}}{2} = K_x \dfrac{C_1^{(n)} - C_0^{(n)} + C_1^{(n+1)} - C_0^{(n+1)}}{2h} + q, \\ u_b \dfrac{C_N^{(n)} + C_N^{(n+1)}}{2} = K_x \dfrac{C_N^{(n)} - C_{N-1}^{(n)} + C_N^{(n+1)} - C_{N-1}^{(n+1)}}{h} + q, \quad n = 0,1,\ldots,L-1. \end{cases} \qquad (18)$$

В данной схеме для нахождения решения на следующем временном слое нельзя записать явную формулу, и на каждом шаге по времени применяется метод прогонки.

После ряда преобразований выражения (17) получим:

$$C_{i+1}^{(n+1)} + C_i^{(n+1)} \frac{4K_x\Delta t + 4h^2 + 2K\Delta t h^2}{u_i h\Delta t - 2K_x\Delta t} - C_{i-1}^{(n+1)} \frac{u_i h\Delta t + 2K_x\Delta t}{u_i h\Delta t - 2K_x\Delta t} =$$

$$= \frac{C_{i+1}^{(n)}\left(2K_x\Delta t - u_{i+1}h\Delta t\right) + C_i^{(n)}\left(4h^2 - 4K_x\Delta t - 2Kh^2\Delta t\right) + C_{i-1}^{(n)}\left(u_{i-1}h\Delta t + 2K_x\Delta t\right)}{u_i h\Delta t - 2K_x\Delta t},$$

это выражение можно представить в виде:

$$C_{i+1}^{(n+1)} + m_i C_i^{(n+1)} - n_i C_{i-1}^{(n+1)} = \hat{f}_i, \tag{19}$$

где

$$m_i = \frac{4K_x\Delta t + 4h^2 + 2k_i\Delta t h^2}{u_i h\Delta t - 2K_x\Delta t}, \quad n_i^x = \frac{u_i h\Delta t + 2K_x\Delta t}{u_i h\Delta t - 2K_x\Delta t},$$

$$\hat{f}_i = \frac{C_{i+1}^{(n)}\left(2K_x\Delta t_i - u_{i+1}h\Delta t\right) + C_i^{(n)}\left(4h^2 - 4K_x\Delta t - 2k_i h^2\Delta t\right) + C_{-1}^{(n)}\left(u_{-1}h\Delta t + 2K_x\Delta t\right)}{u_i h\Delta t - 2K_x\Delta t}.$$

Решив выражение (19) относительно $C_i^{(n+1)}$, получим

$$C_i^{(n+1)} = \frac{\hat{f}_i}{m_i} - \frac{C_{i+1}^{(n+1)}}{m_i} + \frac{n_i}{m_i} C_{i-1}^{(n+1)}. \tag{20}$$

Предположим, что с помощью полной системы из последнего уравнения исключена неизвестная $C_{i+1}^{(n+1)}$. Тогда это уравнение примет вид:

$$C_i^{(n+1)} = S_i\left(D_i - C_{i+1}^{(n+1)}\right), \tag{21}$$

где S_i, D_i ($i = 1,2,...,N-1$) — некоторые коэффициенты.

Отсюда

$$C_{i-1}^{(n+1)} = S_{i-1}\left(D_{i-1} - C_i^{(n+1)}\right). \tag{22}$$

Подставляя последнее выражение в уравнение (20), получим

$$C_{i+1}^{(n+1)} + m_i C_i^{(n+1)} - n_i S_{i-1}\left(D_{i-1} - C_i^{(n+1)}\right) = \hat{f}_i,$$

и следовательно,

$$C_i^{(n+1)} = \frac{\left(\hat{f}_i + n_i S_{i-1} D_{i-1}\right) - C_{i+1}^{(n+1)}}{m_i + n_i S_{i-1}}. \tag{23}$$

Сравнивая формулы (21) и (23), получим для определения S_i и D_i рекуррентные формулы:

$$S_i = \frac{1}{m_i + n_i S_{i-1}}, \quad D_i = \hat{f}_i + n_i S_{i-1} D_{i-1}, \quad \left(i = 1, \ldots, N-1\right). \tag{24}$$

Определим теперь S_0 и D_0. Из первого граничного условия (18) получаем:

$$C_0^{(n+1)} = -\frac{2qh - C_0^{(n)}\left(u_a h + K_x\right) + K_x C_1^{(n)} + K_x C_1^{(n+1)}}{u_a h - K_x},$$

с другой стороны при $i = 0$ имеем:

$$C_0^{(n+1)} = S_0\left(D_0 - C_1^{(n+1)}\right),$$

Сравнивая последние два равенства, находим:

$$S_0 = -\frac{K_x}{u_a h + K_x}, \quad D_0 = \frac{2qh - C_0^{(n)}\left(u_a h + K_x\right) + K_x C_1^{(n)}}{-K_x}. \tag{25}$$

На основании формул (24) последовательно определяются коэффициенты S_i, D_i ($i = 1, 2,..., N-1$) до S_{N-1} и D_{N-1} включительно (прямой ход).

Обратный ход начинается с определения $C_N^{(n+1)}$. Используя второе граничное условие (18), получим для определения $C_N^{(n+1)}$ выражение:

$$C_N^{(n+1)} = \frac{u_b h C_N^{(n)} - K_x C_N^{(n)} + K_x C_{N-1}^{(n)} + K_x S_{N-1} D_{N-1} - 2qh}{K_x\left(S_{N-1} + 1\right) - h u_b}. \tag{26}$$

Теперь по формуле (21) последовательно находим $C_{N-1}^{(n+1)}$, $C_{N-2}^{(n+1)}$, $C_{N-3}^{(n+1)}$, $C_0^{(n+1)}$. Таким образом, концентрация диффундирующей субстанции будет определена во всех точках заданной области.

Двухмерная задача поверхностной диффузии в области, ограниченной береговой линией и, возможно, имеющей открытые границы и водообмен с соседними бассейнами, решается с учетом дрейфа пятна мутности в поле течений. Процесс диффузии в этих условиях описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных, а именно:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\left(x, y\right)\frac{\partial C}{\partial x} + v\left(x, y\right)\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + Q\left(x, y, t\right), \tag{27}$$

где $C(x, y, t)$ — Концентрация взвеси; t — время; $u(x, y)$, $v(x, y)$ — горизонтальные составляющие скорости течения вдоль декартовых координат x, y; K_x, K_y — коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии; Q — функция мощности источника.

Начальные условия задаются в виде:

$$C\left(x, y, 0\right) = C_0 \exp\left\{-\left[\left(x - x_0\right)^2 + \left(y - y_0\right)^2\right] / r_0^2\right\}, \tag{28}$$

где (x_0, y_0) — координаты центра пятна мутности; r_0 — характерный радиус пятна.

Характерный радиус пятна определяется исходя из массы поступившей взвеси M, которая обычно известна. Это соответствует распространению взвеси от мгновенного точечного источника и используется, если $Q = 0$ в уравнении (27).

Граничные условия ставятся следующим образом:

$$v_n C = K_n \frac{\partial C}{\partial n} + q, \tag{29}$$

где n — внутренняя нормаль к границе области; v_n — нормальная составляющая скорости жидкости на границе; K_n — коэффициент диффузии в нормальном направлении; q — известная функция мощности источника взвеси.

При этом криволинейная граница области заменяется ломаной со звеньями, параллельными осям координат, на которых и ставятся граничные условия.

Как известно, [7], при решении двухмерного уравнения методом переменных направлений, схема записывается в виде двух полушагов по времени. На первом полушаге используется вариант дискретизации в направлении оси x:

$$\frac{C_i^{(n+1)} - C_i^{(n)}}{0{,}5 \times \Delta t} + u_i \frac{C_{i+1}^{(n)} - C_{i-1}^{(n)} + C_{i+1}^{(n+1)} - C_{i-1}^{(n+1)}}{4h} =$$
$$= K_x \frac{C_{i+1}^{(n)} - 2C_i^{(n)} + C_{i-1}^{(n)} + C_{i+1}^{(n+1)} - 2C_i^{(n+1)} + C_{i-1}^{(n+1)}}{2h^2}, \tag{30}$$

а на втором, соответственно, вдоль оси y:

$$\frac{C_j^{(n+1)} - C_j^{(n)}}{0{,}5 \times \Delta t} + v_j \frac{C_{j+1}^{(n)} - C_{j-1}^{(n)} + C_{j+1}^{(n+1)} - C_{j-1}^{(n+1)}}{4h} =$$
$$= K_y \frac{C_{j+1}^{(n)} - 2C_j^{(n)} + C_{j-1}^{(n)} + C_{j+1}^{(n+1)} - 2C_j^{(n+1)} + C_{j-1}^{(n+1)}}{2h^2}, \tag{31}$$

где K_x, K_y уменьшены в два раза. Предполагается равенство шагов расчетной сетки h вдоль осей x и y, что, в принципе, необязательно.

В выражениях (30), (31) для упрощения опущены вторые нижние индексы при переменных $C_{i,j}$, $u_{i,j}$ и $v_{i,j}$.

Граничные условия (29) могут быть записаны аналогично одномерной задаче (18), но мы здесь не будем их приводить.

Таким образом, решение двумерного уравнения турбулентной диффузии разбито на два этапа по времени. В случае разбиения расчетной области на M узлов вдоль оси x и на N узлов вдоль оси y, на первом этапе решается конечно-разностное уравнение (30) вдоль оси x — N раз, а на втором — уравнение (31) вдоль оси y — M раз.

Таким образом, метод переменных направлений позволяет достаточно просто перейти от решения одномерной (14) к решению двумерной (27), а также и к решению трехмерной задачи (7) об эволюции диффундирующей консервативной субстанции (взвеси), обладающей собственной вертикальной составляющей скорости, в трехмерном поле течений.

Трехмерное уравнение турбулентной диффузии динамически активной взвеси с учетом дрейфа пятна мутности в поле течений имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}+\left(w-w_c\right)\frac{\partial C}{\partial z}=$$
$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)+Q\left(x,y,z,t\right). \qquad (32)$$

Как следует из уравнения (32), появляется составляющая вертикальной скорости осаждения примеси *wc*. Так как примесь может обладать и отрицательной плавучестью, то *wc* может принимать соответственно значения $wc < 0$, $wc = 0$ и $wc > 0$. При исследованиях мы должны знать величину скорости вертикального движения примеси в жидкости. Вследствие использования для решения уравнения (32) метода переменных направлений конечно-разностные выражения для горизонтальных слоев будут аналогичны приведенным выше (30), (31). Это относится и к выражениям, описывающим граничные условия как на вертикальных границах акватории, так на поверхности и дне акватории (8–13,18).

Разностная схема для вертикальной составляющей *z* имеет вид:

$$\frac{C_k^{(n+1)}-C_k^{(n)}}{\Delta t}+\left(w_l-w_c\right)\frac{C_{k+1}^{(n)}-C_{k-1}^{(n)}+C_{k+1}^{(n+1)}-C_{k-1}^{(n+1)}}{4h}=$$
$$=K_x\frac{C_{k+1}^{(n)}-2C_k^{(n)}+C_{k-1}^{(n)}+C_{k+1}^{(n+1)}-2C_k^{(n+1)}+C_{k-1}^{(n+1)}}{2h^2}+Q. \qquad (33)$$

Решение трехмерного уравнения турбулентной диффузии разбито на три этапа по времени. В случае разбиения расчетной области на *M* узлов вдоль оси *x*, на *N* узлов вдоль оси *y* и на *Z* узлов вдоль оси *z*, на первом этапе решается конечно — разностное уравнение (30) вдоль оси *x* — *N·Z* раз, на втором — уравнение (31) вдоль оси *y* — *M·Z* раз и на третьем — уравнение (33) *M·N* раз вдоль вертикальной оси *z*. Очевидно, что объем вычислений в случае решения трехмерной задачи существенно увеличивается, но в настоящее время это уже нельзя считать недостатком метода, так как ресурсы используемых в настоящее время ПЭВМ значительно возросли.

Полученные решения позволили разработать программное обеспечение для численных расчетов распространения пятен мутности при дноуглублении и дампинге [4]. Подобные расчеты являются обязательной частью ОВОС гидротехнических и дреджинговых проектов, осуществляемых в прибрежно-морской зоне [9–11].

Литература

1. *АльхименкоА.И., Шурыгин И.Г.* Результаты натурных исследований диффузии красителя под действием ветровых волн. // Труды Всесоюзного совещания «Чистое море», 1986, с. 87–94.
2. *Владимиров А.М. и др.* Охрана окружающей среды. — Л., 1991.
3. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики. — М.: Наука, 1970.
4. *Загрядская Н.Н., Калинин С.Г.* Результаты численных исследований распространения облака мутности при дноуглублении и дампинге. // Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2001, № 1.
5. *Караушев А.В.* Турбулентная диффузия и метод смешения. — Л.: Гидрометеоиздат, 1946.
6. *Озмидов Р.В.* Диффузия примесей в океане. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
7. *Фельзенбаум А.И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. — М.: изд-во Академии Наук СССР, 1960.
8. *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей. Том 1. — М.: Мир, 1991.
9. *Шилин М.Б., Погребов В.Б., Лукьянов С.В., Мамаева М.А., Леднова Ю.А.* Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 25, с. 107–122.
10. *Шилин М.Б., Еремина Т.Р., Мамаева М.А.* Дреджинг наводит мосты. В кн.: Экологические аспекты дреджинга. — СПб.: РГГМУ, 2013, с. 427–435.
11. *Chusov A.N., Lednova J., Shilin M.* Ecological Assessment of Dredging in the Eastern Gulf of Finland. // Print ISBN: 978-1-4673-1413-8, DOI: 10.1109/Baltic:2012.6249169 / ISSN 2150-6027: pp. 1–4.

Список авторов

Альхименко Александр Иванович, д-р техн. наук, проф. каф. Водохозяйственного и гидротехнического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ)

Валлиус Генри, д-р геологии, ведущий специалист Геологического института Финляндии

Владимирова Оксана Михайловна, аспирант каф. Океанологии Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ)

Веретенников Валентин Николаевич, канд. техн. наук, проф. каф. Высшей математики и теоретической механики РГГМУ

Жамойда Владимир Александрович, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ВСЕГЕИ)

Жигульский Владимир Александрович, канд. техн. наук, директор ООО «Эко-Экспресс-Сервис»

Загрядская Наталья Николаевна, д-р техн. наук, проф. каф. Водохозяйственного и гидротехнического строительства СПбГПУ

Калинин Сергей Глебович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Государственного Морского проектного института (23 ГМПИ)

Кийко Ольга Алексеевна, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. Экологического консалтингового агентства «Экопроект»

Ковалева Ольга Анатольевна, инженер ВСЕГЕИ

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, зам. директора института Озероведения РАН

Кононенко Мария Ростиславовна, канд. эконом. наук, доц. каф. Комплексного управления прибрежной зоной РГГМУ

Корнеев Олег Юрьевич, д-р техн. наук, зам. генерального директора ОАО «Севморгео»

Котилайнен Аарно, д-р геологии, проф.-исследователь Геологической Службы Финляндии

Коузов Сергей Александрович, науч. сотр. лаборатории Экологии и охраны птиц Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ)

Ланге Евгения Кирилловна, науч. сотр. института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Атлантическое отделение

Литвинчук Лариса Федоровна, канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории Пресноводной и экспериментальной гидробиологии Зоологического института (ЗИН) РАН

Лукьянов Сергей Васильевич, канд. физ.-мат. наук, директор Морского института РГГМУ

Максимов Алексей Александрович, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. ЗИН РАН

Максимов Дмитрий Анатольевич, канд. техн. наук, зам. директора Северо-Западного научно-исследовательского института механизации и электрификации сельского хозяйства

Максимова Екатерина Юрьевна, вед. специалист отдела Природоохранной документации ООО «Эко-Экспресс-Сервис»

Марковец Ирина Михайловна, зам. начальника Информационно-аналитического отдела ФГУП «Балтийская дирекция по техническому обеспечению надзора на море»

Нестерова Елена Николаевна, ст. науч. сотр. ВСЕГЕИ

Погребов Владимир Борисович, д-р биол. наук, гл. науч. сотр. Экологического консалтингового агентства «Экопроект»

Подгайский Эдуард Валерьевич, ученый секретарь Учебно-методического объединения вузов Российской Федерации по образованию в области гидрометеорологии, РГГМУ

Подрезова Надежда Алексеевна, ст. преп. каф. Океанологии РГГМУ

Рыбалко Александр Евменьевич, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотр. ОАО «Севморгео»

Рябчук Дарья Владимировна, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. ВСЕГЕИ
Сергеев Александр Юрьевич, науч. сотр. ВСЕГЕИ
Соловей Наталья Александровна, руководитель группы Анализа и координации ООО «Экоплюс»
Спиридонов Михаил Александрович, д-р геол.-минерал. наук, зав. отделом Региональной геоэкологии и морской геологии ВСЕГЕИ
Сухачева Леонтина Леонидовна, канд. геогр. наук, начальник сектора Экологических исследований научно-исследовательского института Космоаэрогеологических методов (НИИКАМ) – филиала ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ЦНИИМАШ)
Тимошина Алена Владимировна, стажер-исследователь Морского института РГГМУ
Уличев Владимир Иванович, мл. науч. сотр. института Озероведения РАН
Федорова Наталья Константиновна, канд. геол.-минерал. наук, вед. специалист ОАО «Севморгео»
Филиппов Андрей Александрович, канд. биол. наук, гл. науч. сотр. Экологического консалтингового агентства «Экопроект»
Царев Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, зав. каф. Океанологии РГГМУ
Царькова Наталья Сергеевна, начальник отдела Мониторинга и работы с природопользователями ООО «Эко-Экспресс-Сервис»
Чернова Наталья Владимировна, к.б.н., научный сотрудник ЗИН РАН
Чусов Александр Николаевич, канд. техн. наук, зав. каф. Гражданского строительства и прикладной экологии СПб ГПУ
Шилин Михаил Борисович, канд. биол. наук, д-р техн. наук, проф. каф. Промысловой океанологии и охраны природных вод РГГМУ
Шмакова Марина Валентиновна, канд. техн. наук, науч. сотр. института Озероведения РАН
Шуйский Владимир Феликсович, д-р биол. наук, начальник Научно-аналитического отдела ООО «Эко-Экспресс-Сервис»

Требования к представлению и оформлению рукописей для авторов журнала

1. Материал, предлагаемый для публикации, должен являться оригинальным, неопубликованным ранее в других печатных изданиях. Объем статьи может составлять до 1,5 авторских листов (1 а.л. равен 40 тыс. знаков), в исключительных случаях по решению редколлегии – до 2 авторских листов.
2. На отдельной странице приводятся сведения об авторе (авторах) на русском и английских языках: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность и место работы, контактные телефоны, адрес электронной почты. Плата за опубликование рукописей с аспирантов не взимается.
3. Аннотация статьи объемом до 7 строк на русском и английском языках не должна содержать ссылок на разделы, формулы, рисунки, номера цитируемой литературы.
4. Список литературы должен содержать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок.
5. Пронумерованный список литературы (в алфавитном порядке, сначала на русском, затем на иностранных языках) приводится в конце статьи на отдельной странице с обязательным указанием следующих данных: для книг – фамилия и инициалы автора (редактора), название книги, место издания (город), год издания; для журнальных статей – фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, выпуск, страницы (первая и последняя). Разрешается делать ссылки на электронные публикации и адреса Интернет с указанием всех данных.
6. Оформление ссылок в тексте: в квадратных скобках [ ] указать порядковый номер литературы. Если при цитировании делается ссылка на конкретную цитату, формулу, теорему и т.п., следует указывать номер страницы: [13, с. 23].
7. Сноски помещаются на соответствующей странице текста.
8. Таблицы и другие цифровые данные должны быть тщательно проверены и снабжены ссылками на источники. Таблицы приводятся в тексте статьи, номер и название указываются над таблицей.
9. Названия зарубежных компаний приводятся в тексте без кавычек и выделений латинскими буквами. После упоминания в тексте фамилий зарубежных ученых, руководителей компаний и т.д. на русском языке, в полукруглых скобках приводится написание имени и фамилии латинскими буквами, если за этим не следует ссылка на работу зарубежного автора.

Рекомендации по форматированию для подачи рукописи в редакционно-издательский отдел

Формат А5 (148×210) книжный.
Поля: верхнее – 1,8 см; нижнее – 2,3 см; левое – 1,8 см; правое – 1,8 см.
От края до верхнего колонтитула – 0 см, до нижнего колонтитула – 1,8 см.
Колонцифры внизу в зеркальном положении – 10, обычным шрифтом, начинать с титульного листа.
Набрать текст шрифтом Times New Roman, обычный.
Межстрочный интервал – одинарный.
Абзацный отступ – 0,75 см.
Интервал до заголовка – 24 пункта, после – 6.
Размер шрифта: основной текст – 11, таблицы – 9.
Лежачие таблицы поместить в отдельный файл на формат А5 альбомный, поля: верхнее, нижнее и правое – 1,8 см, левое – 2,3 см, шрифт – 9.
Рисунки располагать по тексту в соответствии со ссылкой.
Подрисуночную подпись набрать шрифтом – 9.
В формулах русские буквы прямые, латинские – курсивные, греческие – прямые, тригонометрические функции (sin, cos и др.) набирать прямым шрифтом.
Литература – шрифт 9.
Оглавление поместить в конце рукописи – шрифт 9.

Требования к оформлению статьи для публикации в Ученых записках

Инициалы и фамилии авторов на русском языке.
Название на русском языке.
Аннотация на русском языке.
Ключевые слова на русском языке.
Инициалы и фамилии авторов на английском языке.
Название на английском языке.
Аннотация на английском языке.
Ключевые слова на английском языке.
Формат 17×24 книжный.
Поля зеркальные: верхнее и нижнее – 2,3 см; левое и правое – 1,8 см.
От края до верхнего колонтитула и нижнего колонтитулов – 1,8 см.

Внимание!

Авторская правка в верстке – компенсационная, до пяти буквенных исправлений на странице.

Научное издание

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА № 35

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Редактор: И.Г. Максимова
Компьютерная верстка: Ю.И. Климов

ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 20.08.14. Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,6. Тираж 500 экз. Заказ № 330.
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
Отпечатано в ЦОП РГГМУ

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8484 от 07 февраля 2007 г.
в Управлении Федеральной службы в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу
Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет