Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 48

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года
Выходит 4 раза в год

ISSN 2074-2762

Санкт-Петербург

РГГМУ

2017

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

Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 48. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2017. – 312 с.

Настоящий номер журнала является тематическим и посвящен Году экологии в России. Цель этого решения – привлечь внимание к наиболее проблемным вопросам, существующим в экологической сфере. В издании представлены статьи ведущих российских и некоторых зарубежных специалистов. С учетом междисциплинарного характера экологии статьи сгруппированы по разделам. В разделе «Хроника» освещены основные события жизни университета в области экологии.

Журнал предназначен для ученых, исследователей природной среды, аспирантов и студентов, обучающихся по экологии и смежным специальностям.

Редакционный совет:
Михеев В.Л., канд. юрид. наук, доцент, ректор РГГМУ – *председатель совета.*
Вильфанд Р.М., д-р техн. наук, проф., директор ГМНИЦ РФ; **Кулешов Ю.В.**, д-р техн. наук, проф., зам. начальника Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского по учебной и научной работе; **Лил В.У.**, д-р наук, проф. ун-та г. Гамбург (Германия) и ун-та г. Манчестер (Великобритания); **Румянцев В.А.**, д-р геогр. наук, проф., академик РАН, научный руководитель Института озероведения РАН; **Федоров М.П.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, научный руководитель программы НИУ СПб ГПУ; **Фролов И.Е.**, д-р геогр. наук, проф., член-корреспондент РАН, директор ГНЦ ААНИИ; **Хуакин Л.**, д-р наук, проф., вице-ректор Морского ун-та г. Джейянг (КНР); **Шапрон Б.**, д-р наук, ведущий ученый института морских исследований IFREMER (Франция); **Филатов Н.Н.**, д-р геогр. наук, проф., член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

Редакционная коллегия:
Малинин В.Н., д-р геогр. наук, проф. – *главный редактор.*
Воробьёв В.Н., канд. геогр. наук, проф. – *зам. главного редактора.*
Гайдукова Е.В., канд. техн. наук – *отв. секретарь.*
Барышников Н.Б., д-р геогр. наук, проф.; **Бескид П.П.**, д-р техн. наук, проф.; **Гогоберидзе Г.Г.**, д-р эконом. наук; **Кудрявцев В.Н.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Смышляев С.П.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Угрюмов А.И.**, д-р геогр. наук, проф.; **Фирова И.П.**, д-р эконом. наук, проф.; **Шилин М.Б.**, д-р геогр. наук, проф.; **Щукин Г.Г.,** д-р техн. наук, проф.

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.

ISSN 2074-2762

Подписной индекс 78576 в «Каталоге 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, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2017
© Авторы публикаций, 2017

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

THE FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL
INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
"RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY"

PROCEEDINGS

OF THE RUSSIAN STATE HYDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY

№ 48

A theoretical research journal

Published since October, 2005
4 issues a year

ISSN 2074-2762

St. Petersburg

РГГМУ

2017

UDC 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 48. – St. Petersburg: RSHU Publishers, 2017. – 312 pp.

This Special Issue of the Scientific Papers of the Russian State Hydrometeorological University is devoted to the Year of Ecology in the Russian Federation and is focused on the main and most discussed environmental problems. The Special Issue contains the articles of leading Russian and some European experts. The materials are grouped into several chapters due to the interdisciplinary character of modern Ecology. The Chronicle section highlights the most interesting events and activities in the field of Ecology in which the RSHU professors and students took part. The journal is intended for environmental scientists, PhD and undergraduate students and other specialists in this field of knowledge.

The Editorial Board:
Mikheyev V.L., Candidate of Juridical Sciences, Assistent Professor, Rector of RSHU – *Chairman.*
Vilfand R.M., Doctor of Engineering Science, Professor, Director of Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation; **Kuleshov Yu.V.**, Doctor of Engineering Science, Professor, deputy director of Mozhaisky Military Space Academy for academic affairs and research; **Leal W.**, Dr., Professor of Hamburg University (Germany) and Manchester University (Great Britain); **Rumyantsev V.A.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, scientific director of the Institute of Limnology RAS; **Fedorov M.P.**, Doctor of Engineering Science, Academician of the Russian Academy of Sciences, President of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University; **Frolov I.E.**, Doctor of Geographical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; **Huaqing Lu**, Dr., Professor, vice-rector of Maritime University of Zhejiang (China); **Shapron B.**, Dr., leading scientist of French Research Institute for Exploitation of the Sea IFREMER (France); **Filatov N.N.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, chief researcher at the Institute of Water Problems of the North Karelian Research Centre of RAS.

Editors:
Malinin V.N., Doctor of Geographical Sciences, Professor – *Editor in Chief.*
Vorobyev V.N., Candidate of Geographical Sciences, Professor – *Deputy Editor in Chief.*
Gaidukova E.V., Candidate of Engineering Sciences – *Executive editor.*
Baryshnikov N.B., Doctor of Geographical Sciences, Professor; **Beskid P.P.**, Doctor of Engineering Science, Professor; **Gogoberidze G.G.**, Doctor of Economics; **Kudryavtsev V.N.**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor; **Smyshlyaev S.P.**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor; **Ugryumov A.I.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **Firova I.P.**, Doctor of Economics, Professor; **Shilin M.B.**, Doctor of Geographical Sciences, Professor; **Shchukin G.G.,** Doctor of Engineering Science, Professor.

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: 192007, Voronezhskaya str., 79, St. Petersburg, Russia.

© Russian State Hydrometeorological University (RSHU), 2017
© Authors of publications, 2017

ISSN 2074-276

СОДЕРЖАНИЕ

От редколлегии журнала 9

Глобальная экология

Малинин В.Н. Глобальный экологический кризис и климат 11
Петров К.М. Биосфера и цивилизация: проблемы коэволюции 33

Гидроэкология

Аладин Н.В., Чида Т., Крето Ж.-Ф., Ермаханов З.К., Жоллибеков Б., Миклин Ф., Плотников И.С., Егоров А.Н. Современные проблемы и возможное будущее Аральского моря 41
Демин А.П. Сточные воды и качество воды в бассейне реки Волга (2000–2015 гг.) 55
Дмитриев В.В., Огурцов А.Н. Устойчивость сложных систем в природе и обществе: методология, оценка, результаты 72
Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование как основа планирования рационального использования водных ресурсов 85
Румянцев В.А., Рыбакин В.Н., Токарев И.В. Распространение вод притоков и подземных вод в Ладожском озере по данным изотопных индикаторов 94
Румянцев В.А., Крюков Л.Н. Актуальность оптимизации государственного мониторинга крупнейших водоемов России на примере Ладожского озера 110
Филатов Н.Н., Меншуткин В.В. Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных водоемов под влиянием климата и антропогенных факторов 120

Морская экология

Бандурин К.В., Архипов А.Г. Современное состояние водных биологических ресурсов в океанических районах исследований АтлантНИРО 148
Котенев Б.Н., Кровнин А.С., Масленников В.В., Мордасова Н.В., Мурый Г.П. Перспективы развития мирового рыболовства в связи с изменением климата 167
Кречик В.А., Капустина М.В., Бубнова Е.С., Гриценко В.А. Абиотические условия придонных вод Гданьской впадины Балтийского моря в 2016 году 186
Лебедев А.А., Тихонова О.А., Блиновская Я.Ю., Чайка В.В., Кирьянов А.В., Христофорова Н.К., Пикула К.С., Шевченко В.П., Голохваст К.С. Влияние угольного терминала на состав морских взвесей залива Находка (Японское море) 195
Погребов В.Б., Чернова Н.В., Кийко О.А., Пчелинцев В.Г., Чаадаева Е.В., Позднякова Н.А. Чувствительность восточной части Финского залива (Балтийское море) к разливам нефти в зимний период (на англ. яз.) 202

Холмянский М.А., Снопова Е.М., Владимиров М.В., Заносов О.Ю.
Современное состояние и прогноз развития морских геоэкологических исследований 216

Метеоэкология

Козлов В.Н., Доронин А.П., Петроченко В.М. Экологическая опасность лесных пожаров и методы ее предотвращения 234
Пасечкина В.Ю., Истомина М.Н., Добровольский С.Г.
Сельскохозяйственные засухи мира и их эволюция во времени: природные параметры и характеристики социально-экономических ущербов 249
Самуленков Д.А., Мельникова И.Н., Донченко В.К., Сапунов М.В.
Исследование загрязнений атмосферы с помощью лидарного мониторинга 266

Биоресурсы

Жигульский В.А, Шилин М.Б.,Царькова Н.С., Глушковская Н.Б.
Воздействие портостроительства в Арктике на орнитофауну на примере порта Сабетта 281

Хроника

Посвящается Году экологии в России 296

Список авторов. 306
Условия публикации в журнале «Ученые записки РГГМУ» 309

CONTENTS

From the editorial board 9

Global ecology

Malinin V.N. Global ecological crisis and climate 11
Petrov K.M. The biosphere and civilization: problems of coevolution 33

Hydroecology

Aladin N.V., Chida T., Cretaux J.-F., Ermakhanov Z.K., Jollibekov B., Micklin P., Plotnikov I.S., Egorov A.N. Modern problems and possible future of the Aral Sea 41
Demin A.P. Waste water and water quality in the Volga river basin (2000–2015) . . . 55
Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N. Sustainability of complex systems in nature and society: methodology, evaluation, results 72
Kondratyev S.A., Shmakova M.V. Mathematical modeling as a basis for planning sustainable use of water resources 85
Rumyantsev V.A., Rybakin V.N., Tokarev I.V. Distribution of waters of inflows and underground waters in lake Ladoga according to isotope indicators 94
Rumyantsev V.A., Kryukov L.N. The relevance of optimization of the state monitoring of largest reservoirs in Russia on the example of lake Ladoga 110
Filatov N.N., Menshutkin V.V. Problems of estimation of influence climate and antropogenic factors on to gydrothermodynamics and ecosystems of large stratified inland waters 120

Marine ecology

Bandurin K.V., Arkhipov A.G. Modern state of aquatic biological resources in the oceanic research areas of AtlantNIRO 148
Kotenev B.N., Krovnin A.S., Maslennikov V.V., Mordasova N.V., Moury G.P. Development prospects of world fisheries in relation to climate change 167
Krechik V.A., Kapustina M.V., Bubnova E.S., Gritsenko V.A. Abiotic conditions of bottom waters in the Gdansk deep of the Baltic Sea in 2016 186
Lebedev A.A., Tikhonova O.A., Blinovskaya Ya.Yu., Chaika V.V., Kirianov A.V., Khristophorova N.K., Pikula K.S., Shevchenko V.P., Golokhvast K.S. Coal terminal impact on marine suspention composition: Nakhodka gulf (Japan Sea) 195
Pogrebov V.B., Chernova N.V., Kiyko O.A., Pchelintsev V.G., Chaadayeva E.V., Pozdnyakova N.A. Sensitivity of the Eastern Gulf of Finland (the Baltic Sea) to the oil spills in the ice period of year 202
Kholmyanskiy M.A., Snopova E.M., Vladimirov M.V., Zanosov O.Y. Current status and forecast of development of marine geoecological researches 216

Ecology of the atmosphere

Kozlov V.N., Doronin A.P., Petrochenko V.M. Ecological danger from forest fires and methods of their prevention 234

Pasechkina V.Yu., Istomina M.N., Dobrovolsky S.G. World agricultural droughts and their time evolution: natural parameters and characteristics of social-economic damages 249
Samulenkov D.A., Melnikova I.N., Donchenko V.K., Sapunov M.V. Studying pollution of the atmosphere with lidar monitoring 266

Bioresources

Zhygulskiy V.A., Shilin M.B., Tsarkova N.S., Glushkovskaya N.B. Effect of harbour construction in Arctic on ornithofauna on the port Sabetta taken as an example 281

Chronicle 296

List of authors 306
Terms of publication in the RSHU Proceedings Journal 309

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА

Президент России Владимир Путин 5 января 2016 года подписал указ, в соответствии с которым 2017 год в России объявлен годом экологии. Цель этого решения – привлечь внимание к проблемным вопросам, существующим в экологической сфере, и улучшить состояние экологической безопасности страны. Запланировано в течение года реализовать 234 проекта и провести 600 природоохранных мероприятий, на которые выделено из государственного бюджета 238 млрд руб. Будем надеяться, что все мероприятия будут выполнены, а все деньги потрачены по назначению. Однако это не более чем капля в море нарастающих экологических проблем, ибо в России почти 90 % сточных вод попадают в водоемы практически без очистки, а 70 % поверхностных вод и до 30 % подземных потеряли питьевое значение и перешли в категории загрязненности «условно чистая» и «грязная». Около 70 % населения РФ употребляют воду, не соответствующую стандартам питьевой воды.

На состоявшемся 8 августа 2017 года совещании в Волгограде премьер-министр РФ Д. Медведев отметил, что «*в бассейне реки Волги сложилась самая напряженная экологическая ситуация, которая по многим позициям существенно хуже, чем общая ситуация. В воды Волги попадает более трети, а именно 38 процентов всех российских загрязненных стоков. В частности, ежегодно сбрасывается свыше 5,5 кубических километров загрязненных сточных вод, а нормативная очистка проводится лишь в отношении 10 процентов стоков. Со сточными водами в реку поступает свыше 2,5 миллионов тонн в год загрязняющих веществ. На программу по очистке Волги до 2025 года из федерального бюджета выделено 257 миллиардов рублей*».

Кроме того, следует иметь в виду, что многие экологические проблемы давно перешли из разряда региональных в разряд глобальных. Индекс живой планеты, характеризующий биологическое разнообразие Земли, стремительно уменьшается, что является свидетельством развивающегося глобального экологического кризиса.

ЮНЕСКО выделяет десять первоочередных экологических проблем:

1. Продолжающийся рост общего населения Земли, лишь в малой степени поддающийся контролю, и демографическое переуплотнение ряда регионов.
2. Изменение структуры, состава и продолжающееся загрязнение атмосферы, вызывающие глобальное изменение климата.
3. Исчерпание потенциала продуктивности агроэкосистем, приводящее к дефициту продуктов питания и к снижению их качества.
4. Усиливающийся дефицит пресной питьевой воды адекватного качества для водопользователей и водопотребителей.
5. Подъем уровня, разбалансирование газового буфера и продолжающееся загрязнение (в том числе эвтрофирование) Мирового океана.

6. Незамедляющиеся темпы сокращения площадей тропических и северных лесных экосистем.

7. Общий биосферный кризис биологического разнообразия, выражающийся в высоких темпах вымирания различных видов растений и животных. Вытеснение в пределах биосферы устойчивых естественных экосистем неустойчивыми антропогенными (городскими, сельскохозяйственными и др.).

8. Увеличение площадей пустынь за счет смежных экосистем («опустынивание») и возникновение новых пустынь (Арал-Кум) при одновременной деградации почв сельскохозяйственных угодий.

9. Освобождение традиционных и образование новых экологических ниш, заполняемых нежелательными организмами (вредителями, возбудителями новых заболеваний растений, животных и человека, в том числе микроорганизмами, устойчивыми к антибиотикам).

10. Накопление в виде мусорных свалок непереработанных или трудноперерабатываемых отходов.

Сверхсерьезность указанных проблем не вызывает сомнений. Важнейшим фактором, способствующим их возникновению, на наш взгляд, является безответственное и безнравственное отношение к природной среде на всех уровнях: от бытового до государственного. Помните знаменитый лозунг? Мы не ждем милости от природы, взять их у нее – вот наша задача. В течение многих десятилетий и столетий мы брали и брали от природы все, что могли. И вот результат: в настоящее время антропогенное воздействие на природную среду настолько велико, что она уже не в состоянии компенсировать изменяющиеся условия и начинает разрушаться.

Почти все из перечисленных задач в настоящее время просто не поддаются решению. Как можно остановить продолжающееся загрязнение атмосферы, в том числе рост выбросов в атмосферу углекислого газа, способствующих глобальному потеплению климата, или подъем уровня Мирового океана? Но если остановить нельзя, то замедлить вполне реально. Чтобы экологический кризис не перешел в конечную стадию – экологическую катастрофу. Именно это следует рассматривать как глобальный экологический вызов, стоящий перед человечеством. Иначе человечеству грозит вырождение.

Одной из задач Года экологии в России является развитие экологической ответственности всех слоев общества. Редколлегия журнала «Ученые записки РГГМУ» считает своим долгом участвовать в столь важном деле. Поэтому было принято решение из присланных в редколлегию статей, посвященных различным актуальным проблемам экологии, в том числе тем, которые перечислены выше, подготовить специальный выпуск журнала. Среди авторов много известных авторитетных ученых. С учетом междисциплинарного характера экологии статьи были сгруппированы по разделам. Надеемся, что представленные в этом номере статьи вызовут значительный интерес у читателей.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК [504.61+504.7]:551.583

В.Н. Малинин

ГЛОБАЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС И КЛИМАТ

Российский государственный гидрометеорологический университет,
malinin@rshu.ru

V.N. Malinin

GLOBAL ECOLOGICAL CRISIS AND CLIMATE

В статье даются краткое описание глобального экологического кризиса, вызывающих его факторов и оценка влияния ряда климатических процессов на биосферу и человеческое общество. Обсуждаются изменения индекса живой планеты, парниковый эффект как основной фактор глобального потепления, особенности обмена углекислым газом между океаном и атмосферой, экологические последствия роста уровня Мирового океана.

***Ключевые слова**: экологический кризис, индекс живой планеты, климат, глобальное потепление, парниковый эффект, обмен углекислым газом между океаном и атмосферой, уровень Мирового океана, опасные гидрометеорологические явления.*

The article gives a brief description of the global ecological crisis, the factors causing it, and assessments of the impact of a number of climatic processes on the biosphere and human society. Changes in the living planet index, the greenhouse effect as the main factor of global warming, peculiarities of carbon dioxide exchange between the ocean and the atmosphere, the ecological consequences of the sea level rise are discussed.

***Keywords:** ecological crisis, living planet index, climate, global warming, greenhouse effect, exchange of carbon dioxide between the ocean and the atmosphere, global sea level, dangerous hydrometeorological phenomena.*

Введение

Безответственное отношение к природе –
раковая опухоль в теле человечества, которая
через пищу, воду и воздух разъедает его изнутри

Если кратко, то глобальный экологический кризис – это *нарушение равновесия* между человеческим обществом и окружающей его природной средой во всем многообразии последней: с землей, водой, лесами, животным миром, воздухом. Очень большое число людей считает, что равновесие между человеческим обществом и природной средой нарушено, причем уже довольно давно. По сути это означает, что глобальный экологический кризис (ГЭК) на нашей планете не только

наступил, но и продолжает интенсивно развиваться. Это объективная реальность, данная нам в «субъективных ощущениях» и проявляющаяся прежде всего в том, что мы называем *ухудшением качества жизни*, которое обусловлено повсеместным снижением качества потребляемых продуктов питания, питьевой воды и ее дефицитом, загрязнением воздуха, особенно в крупных городах [8]. Есть и более точные показатели ГЭК. В частности, как будет показано ниже, индекс живой планеты, характеризующий биологическое разнообразие Земли, стремительно уменьшается.

Разумеется, полное обсуждение всех аспектов ГЭК невозможно в рамках одной статьи, поэтому цель данной работы состоит лишь в кратком описании ГЭК и факторов, его вызывающих, и в оценке влияния ряда климатических процессов на глобальную биосферу и человеческое общество. В соответствии с этим основными задачами являлись:

- краткое описание ГЭК и факторов, его обусловливающих;
- оценка влияния потепления климата на глобальную биосферу;
- анализ парникового эффекта в атмосфере как основного фактора глобального потепления;
- оценка обмена углекислым газом между океаном и атмосферой;
- анализ экологических последствий роста уровня Мирового океана.

Глобальный экологический кризис и факторы, его обусловливающие

Достаточно очевидно, что чрезмерное вмешательство человека в естественную среду обитания может приводить к деградации и даже к необратимым последствиям, когда ее восстановление замедляется, а затем и останавливается. Вследствие нарушения равновесия происходит стремительное сокращение биологического разнообразия, то есть невосполнимая гибель многих животных и растений. Важным условием существования биосферы является ее разнообразие, которое обеспечивает непрерывный биохимический круговорот вещества и потоков энергии, поддерживая связи атмосферы, литосферы, гидросферы и создавая целостность природной среды. Именно биологическое разнообразие обеспечивает системе устойчивость через множество внутренних и внешних взаимосвязей и взаимодействий.

В биосфере имеется большой набор процессов регулирования с обратной связью и, как следствие, набор циклических процессов, позволяющих ей компенсировать изменяющиеся условия. Однако *масштабы человеческой деятельности и связанного с ней использования ресурсов растут настолько быстро, что окружающая среда, которая всегда обеспечивала условия для нашего развития и роста, уже не в состоянии* компенсировать изменяющиеся условия и *начинает разрушаться* (WWF. Живая планета – 2016). По существу, в настоящее время антропогенное воздействие человеческой деятельности на природу настолько велико, что подошло к своей критической отметке [17].

По мнению экспертов Всемирного фонда дикой природы (WWF), если нынешние темпы расходования природных ресурсов и уничтожения биосферы не будут уменьшены, уже к 2040 г. нашу планету ждет ГЭК, который может поставить под вопрос выживание человечества. Речь идет прежде всего о невозобновляемых

энергетических ресурсах, воде и пригодной для возделывания сельскохозяйственных культур почве. На наш взгляд, при данной формулировке ГЭК возникает некоторая путаница. Более правильно следует говорить о возможной глобальной экологической *катастрофе,* которая может разразиться к 2040 г. Экологическая катастрофа отличается от экологического кризиса тем, что кризис – это обратимое состояние, где человек выступает активно действующей стороной, а катастрофа – необратимое явление, что означает невозможность возврата глобальной экосистемы к естественным условиям.

ГЭК происходит за счет действия значительного числа разнообразных факторов, которые в упрощенном виде можно разделить на несколько больших групп: экономико-социальные, климатические, геофизические и антропогенные. Деление на указанные группы в определенной степени условно, так как некоторые факторы одновременно могут относиться к разным группам. Например, парниковый эффект является важнейшей причиной современных изменений климата, однако его генезис зависит от совокупности естественных и антропогенных факторов.

К ***экономико-социальным факторам*** относятся экспоненциальный рост мировой экономики, приводящий к исчерпанию физических возможностей Земли, перенаселенность и неразумная урбанизация территории планеты; физическая и нравственная деградация человека, усиление социального неравенства в обществе. В результате роста мировой экономики происходит увеличение выбросов в атмосферу отходов производства, углекислого газа и других парниковых газов, загрязнения почвы и океана. Например, только за 25 послевоенных лет США повысили объем производства в 2,5 раза, одновременно увеличив в 20 раз загрязнение окружающей среды. С развитием химизации производства растет количество трудноокисляемого мусора, которое уже приближается к общей массе живых организмов биосферы, уступая ей лишь в 2 раза, но зато в 5 раз превышает производство этой биомассы в год. Как образно выразился в своей книге «Экологический кризис» экономист Кеннет Е. Баулдинг, «конечным продуктом экономической жизни является мусор». Что касается перенаселенности планеты, то биологическая численность человеческого вида превышена примерно в 12 000 раз, а социальная (обеспеченность жизненными ресурсами) – в 6 раз [15]. Физическая деградация человека связана с резким ростом числа ранее неизвестных и зачастую неизлечимых болезней, а также алкоголизма, наркомании, заболеваемости СПИДом и др.

Но еще более страшной является нравственная деградация! Отсутствие нравственности и стремление получить материальную прибыль любой ценой – вот в чем корень проблемы. Именно *безответственное и безнравственное отношение к нашей праматери-природе на всех уровнях, от бытового до государственного, в конечном счете бумерангом бьет по самому человечеству и может стать спусковым механизмом его гибели, то есть биологического вырождения*. Крупнейшая в XX в. экологическая катастрофа высыхания Аральского моря полностью обусловлена неразумной человеческой деятельностью. Такого рода примеров можно привести немало. Именно безответственное отношение государственных органов, а также «владельцев заводов, яхт, пароходов» к проблемам экологии – наиболее опасный вид нравственной деградации.

Антропогенные факторы. Пожалуй, ключевыми антропогенными факторами являются использование возобновляемых природных ресурсов в масштабах, превосходящих способность природы к возобновлению, и нарастающее загрязнение вредными для окружающей среды веществами в масштабах от локальных до глобального. К основным видам загрязнения относятся следующие.

• *Выбросы в атмосферу* продуктов сжигания ископаемого топлива (прежде всего углекислого газа) и промышленного производства, которые приводят к усилению парникового эффекта, ухудшению качества атмосферного воздуха, образованию ядовитого смога над крупными городами, выпадению кислотных дождей и к другим негативным явлениям. Достаточно сказать, что в индустриальный период происходит почти экспоненциальный рост концентрации CO_2 в атмосфере, которая с 1800 г. увеличилась примерно на 35 % – с 281 до 400 млн$^{-1}$, причем такого высокого уровня она не достигала за последние 650 тыс. лет.

• *Истощение и загрязнение вод суши.* В последние десятилетия отмечается быстрое усиление в пространственной дифференциации водных ресурсов. Там, где их было мало, становится, как правило, еще меньше и наоборот. В новом Докладе ООН о состоянии водных ресурсов мира (2016) говорится, что проблема питьевой воды еще никогда не стояла так остро: от недостатка водных ресурсов сегодня страдают 40 % людей во всем мире, причем более почти 780 млн человек не имеют доступа к чистым источникам питьевой воды. Ожидается, что в период с 2000 по 2050 г. мировой спрос на воду для промышленных целей увеличится на 400 %. ООН предполагает, что к середине XXI в. до 4 млрд человек могут жить, постоянно испытывая нехватку воды. Все это побудило Папу Римского Франциска 24 февраля 2017 г. сказать на конференции по водным ресурсам, что «*недостаточные объемы пресной воды в будущем могут стать причиной третьей мировой войны*». Это слишком важное заявление, чтобы его игнорировать.

Очень серьезной проблемой является загрязнение вод суши за счет экстенсивного орошения в сельском хозяйстве, неконтролируемых выбросов пестицидов и других химикатов в водоемы, отсутствия надлежащей очистки сточных вод и других факторов, что приводит к огромному превышению количества обычных вредных веществ свыше предельно допустимых концентраций (ПДК). Так, в России почти 90 % сточных вод попадает в водоемы практически без очистки, а 70 % поверхностных вод и до 30 % подземных потеряли питьевое значение и перешли в категории загрязненности «условно чистая» и «грязная». Около 70 % населения РФ употребляют воду, не соответствующую стандартам питьевой воды. В развивающихся странах ситуация еще хуже.

• *Загрязнение почв* из-за выпадения загрязненных осадков, но особенно от использования пестицидов и минеральных удобрений, которые применяются для повышения урожайности сельхозпродукции. При этом с каждым новым годом их требуется все больше и больше, в результате процесс идет по восходящей, и уже сегодня в ряде аграрноразвитых стран (США, Голландии и др.) возникают громадные массивы мертвой почвы, на которой себя хорошо чувствуют лишь генетически модифицированные растения. Растения с нормальной генетикой на такой почве расти и давать полноценное потомство не могут.

• *Загрязнение океана* и изменение свойств океанических вод за счет нефтепродуктов и других отходов промышленного производства, выноса загрязненных

речных вод в моря и океан, захоронения в океанических водах высокотоксичных химических и радиоактивных веществ, окисление водных масс за счет снижения показателя *pH*, вызванного попаданием в океан углекислого газа из атмосферы Земли. С 1890 г. кислотность океана повысилась на 30 %. Особенно большое влияние на биоресурсы океанических вод оказывают разливы нефти при катастрофах гигантских танкеров и нефтяных платформ. Огромное количество нефти вылилось в Мексиканский залив во время аварии на нефтяной платформе «Бритиш петролеум» 20 апреля 2010 г. Произошла беспрецедентная экологическая катастрофа, которая, возможно, оказала на природу воздействие не меньшее, чем Чернобыль [11]. Однако она не могла оказать существенное влияние на интенсивность Гольфстрима. Дело в том, что вытекающее из Флоридского пролива Флоридское течение обязано своим происхождением Малому Антильскому течению, входящему в Карибское море и далее несущему свои воды в Мексиканский залив, поэтому значительное уменьшение расходов этого течения возможно только при аналогичном уменьшении расходов Малого Антильского течения [11].

Геофизические факторы – землетрясения, извержения вулканов, цунами и др. Хотя указанные факторы носят эпизодический характер, однако они вызывают значительные экономико-экологические последствия, в т. ч. приводят к массовой гибели людей. При землетрясениях происходит нарушение инфраструктуры и разрушение жилищ людей, активизируются гравитационные склоновые процессы: обвалы, осыпи, оползни, сели, нарушается режим поверхностных и подземных вод. Естественно, все это сказывается на биогеоценозах. При этом наиболее крупные землетрясения сопровождаются цунами – длинной океанической волной, обрушивающейся с огромной разрушительной силой на берег.

Сильнейшим землетрясением в истории наблюдений является чилийское землетрясение, его магнитуда составила, по разным оценкам, от 9,3 до 9,5. Землетрясение произошло 22 мая 1960 г., его эпицентр располагался возле города Вальдивия в 435 км южнее Сантьяго. Подземные толчки вызвали мощное цунами, высота волн которого достигала 10 м. Количество жертв составило около 6 тыс. человек, причем основная часть людей погибла именно от цунами. Ущерб в ценах 1960 г. составил более 675 млн долл.

26 декабря 2004 г. произошло землетрясение в Индийском океане, близ западного берега северной части острова Суматра. Землетрясение силой 8,9–9 баллов спровоцировало возникновение цунами, сразу же обрушившегося на острова Суматра и Ява, а затем на побережье Таиланда, Бангладеш, Индии и других стран. Высота волны в некоторых районах достигла 30 м. Общее количество погибших, по разным данным, составляет от 200 до 300 тыс. человек. Более точные цифры не установлены до сих пор, т. к. множество тел было унесено водой. К настоящему моменту именно это цунами считается самым разрушительным. По общим оценкам, ущерб от катастрофы составил порядка 10 млрд долларов США.

В 2011 г. 11 марта огромная 10-метровая волна, передвигавшаяся со скоростью 800 км/ч, захлестнула восточное побережье Японии и привела к гибели или исчезновению свыше 18 тыс. человек. Причиной ее появления стало землетрясение магнитудой 9,0, произошедшее на глубине 32 км восточнее острова Хонсю. Около 452 тыс. оставшихся в живых японцев были перемещены во временные

убежища. Многие проживают в них по сегодняшний день. Землетрясение и цунами вызвали аварию на АЭС «Фукусима», после которой произошли существенные радиоактивные выбросы в атмосферу и Тихий океан. Общий ущерб составил 235 млрд долл.

Что касается извержений вулканов, то они сопровождаются массовыми выбросами в стратосферу пепла и аэрозолей. При особо крупных извержениях (Пинатубо, июнь 1991 г.; Агуанг, март 1963 г. и др.) это может приводить к многомесячному охлаждению атмосферы, которое получило название «ядерная зима». В результате извержений вулканов происходят нарушения инфраструктуры, выпадают кислотные дожди, в почву поступают тяжелые металлы и другие загрязнители, которые оказывают ощутимое воздействие на биосферу. Есть данные, что за последние 500 лет от вулканических извержений на Земле погибло 5 млн человек. Особого внимания заслуживает Йеллоустонский вулкан, который считается супервулканом, поскольку его извержение может кардинально повлиять на климат планеты и стереть с лица Земли свыше 70 % городов США. В начале 2017 г. произошел первый крупный выброс магмы. А 21 июня 2017 г. университет Юта, который осуществляет мониторинг вулкана, сделал официальное заявление: с 12 по 20 июня 2017 г. зарегистрировано 464 землетрясения, причем 15 июня – с магнитудой 4,5. И это уже серьезно, ибо если вулкан проснется по-настоящему, то наступление апокалипсиса неизбежно.

Климатические факторы – глобальное потепление климата, парниковый эффект, сдвиг климатических зон, повышение уровня океана, его окисление, рост стихийных и опасных гидрометеорологических явлений, истощение озонового слоя, из которых главенствующим является глобальное потепление. Именно оно способствует усилению многих неблагоприятных для человечества природных процессов, эколого-социально-экономический ущерб от которых огромен. Краткий перечень их приведен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень эколого-социально-экономических ущербов, вызванных глобальными изменениями климата [8]

Вид ущерба	Описание ущерба
Здоровье людей	Гибель людей в результате наводнений, штормов, тайфунов, ураганов, число которых возрастает с потеплением климата
	Повышение уровней заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца, заболеваний органов дыхания, нервной системы, почек и др. в дни с жаркой погодой, количество которых в летний период будет увеличиваться
	Возрастание числа инфекционных и паразитарных заболеваний, связанных с повышением количества осадков, увеличением заболоченных площадей, изменением ареалов природно-очаговых инфекций
	Увеличение числа кишечных инфекций за счет нарушения нормального функционирования водопроводно-канализационных и инженерных сооружений
	Увеличение смертности и заболеваемости населения за счет загрязнения воздуха взвешенными частицами и другими опасными компонентами в результате лесных пожаров

Окончание табл. 1

Вид ущерба	Описание ущерба
Обеспечение продовольствием	Потери плодородия земель за счет водных эрозий, уплотнения почв, опустынивания, минерального голодания, засоления и подтопления, загрязнения
	Перестройка почвенной биоты, снижение общей продуктивности земель
	Недостаток водных ресурсов в засушливых районах
	Рост паводков и наводнений в результате повышения частоты ливневых осадков
	Появление чужеродных видов-гангстеров, небывалое распространение традиционных вредителей сельскохозяйственных культур и микроорганизмов, в т. ч. в регионах, где они раньше не встречались
Инфраструктура и население	Беспрецедентные по масштабам стихийные бедствия, приводящие к жертвам среди населения и к большим разрушениям объектов инфраструктуры вследствие увеличения повторяемости экстремальных засух, наводнений, ураганов и циклонов
	Необходимость создания большого запаса энергоносителей в качестве защиты от экстремальных разбросов температуры
	Разрушение зданий, промышленных предприятий, нарушение деятельности инженерных коммуникаций в результате таяния вечной мерзлоты
	Задымление на больших территориях за счет торфяных и лесных пожаров
	Нарушение экологического равновесия биосферы в целом

Отметим, что есть и другой взгляд на экологические проблемы, отчетливо представленный в работе Г.Т. Фрумина [16], который относит ГЭК к числу научных мифов. Он приводит различные высказывания из работ многих ученых, опровергающих, по его мнению, кризисный характер экологического состояния планеты. В частности, к числу ярых оптимистов относится известный датский ученый Б. Лоборг [19], который считает, что страх перед экологической катастрофой искусственно раздут и не имеет под собой серьезных оснований, поэтому «нет повода для уныния. Мы живем в лучшую эпоху. Все мрачные прогнозы несбыточны. Апокалипсиса не будет».

Возможно, апокалипсиса не будет, но явные признаки его наступления наблюдаются уже сегодня. В данном случае оптимизм – опасная штука. Сидеть сложа руки и смотреть, как разгорается лесной пожар, в надежде, что дождь его потушит, – это может закончиться тем, что все сгорит дотла.

Влияние потепления климата на глобальную биосферу

Параметром, характеризующим состояние глобальной биосферы, является индекс живой планеты (ИЖП), который отражает общее состояние биологического разнообразия и рассчитывается на основе собранных данных о популяциях позвоночных видов и усредненной динамики их численности. По сути, ИЖП характеризует экологическое состояние планеты. Он основан на научных данных о состоянии 14 152 популяций 3706 видов позвоночных животных (млекопитающих, птиц, пресмыкающихся, земноводных и рыб), обитающих во всем мире [3].

Развитие ГЭК приводит к стремительному сокращению биологического разнообразия, то есть невосполнимой гибели многих животных и растений. Средняя

численность популяций животных демонстрирует тревожную тенденцию к снижению. Динамика ИЖП с 1970 по 2012 г. указывает на 58 %-е снижение средней численности позвоночных (рис. 1). За период чуть больше 40 лет численность популяций позвоночных видов снизилась более чем вдвое. Согласно имеющимся данным средние темпы снижения составляют около 2 % в год, причем признаки замедления этого процесса пока отсутствуют [7]. Правда, надо отдать должное, что поставленная цель Конвенцией по биологическому разнообразию [1] снижения темпов ИЖП к 2010 г. в принципе была достигнута. В течение 2005–2012 гг. биологическое разнообразие практически не снижалось.

Наибольшей потенциальной угрозой для биоразнообразия в ближайшие десятилетия является изменение климата. Существует несколько причин, по которым растениям и животным сложнее приспосабливаться к глобальному потеплению. Одна из них заключается в чрезвычайной стремительности темпов изменений. Ожидается, что в текущем столетии средние глобальные температуры будут повышаться быстрее, чем в какой-либо другой период истории планеты, по крайней мере за прошедшие 10 тыс. лет. Многие виды просто не смогут достаточно быстро адаптироваться к новым условиям или переместиться в районы, более подходящие для их выживания [1]. В связи с этим значительный интерес представляет оценка влияния глобальной температуры воздуха на ИЖП. Впервые такая оценка была сделана аспирантом автора в работе [14]. Значения ИЖП брались за период 1970–2005 гг. из доклада [4], в котором указывается, что ИЖП рассчитывался по данным популяций 1686 видов позвоночных животных во всех регионах мира, то есть по значительно меньшему объему информации, чем в последующем докладе [3]. Коэффициент корреляции между глобальной температурой и ИЖП составил $r = 0{,}91$, то есть температура воздуха описывает чуть более 80 % изменчивости ИЖП. Сравнение ИЖП из разных докладов показало наличие почти одинаковых трендов и высокого коэффициента корреляции ($r = 0{,}95$).

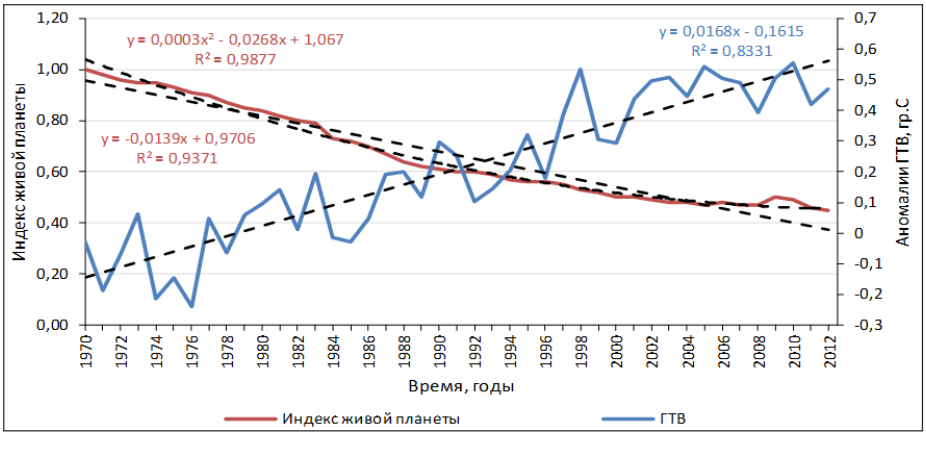

Рис. 1. Межгодовой ход индекса живой планеты
и аномалий глобальной температуры воздуха за период 1970–2012 гг.

В данной работе выполнено уточнение характера связи между ИЖП [3] и аномалиями глобальной температуры воздуха (ΔГТВ) [27]. На рис. 1 приведен межгодовой ход ИЖП и ΔГТВ за период 1970–2012 гг. Нетрудно видеть, что между ними отмечается ярко выраженная отрицательная связь, которая характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0{,}89$. Это означает, что почти 80 % изменчивости ИЖП приходится на долю глобальной температуры воздуха, остальные 20 %, очевидно, связаны с антропогенной деятельностью.

Отметим, что линейный тренд описывает почти 94 % изменчивости ИЖП, а нелинейный – 99 %. Используя уравнение линейного тренда, легко определить год, когда ИЖП станет равным нулю. Это 2044 г., когда может наступить экологический коллапс. Из уравнения тренда для ΔГТВ следует, что в 2044 г. ΔГТВ = 1,11 °С. Используя линейную связь между ИЖП и ΔГТВ, легко получить, что в 2044 г. ИЖП = 0,04. Это близко соответствует предыдущей оценке.

Однако реализация такого сценария и наступление экологического коллапса в 40-х годах текущего столетия представляются все же маловероятными. Биологическое разнообразие обеспечивает глобальной биосферной системе устойчивость через множество внутренних и внешних взаимосвязей и взаимодействий, то есть способность к самовосстановлению. Слабейшие организмы вымирают, сильные – в конечном счете приспосабливаются к новым условиям. Как видно из рис. 1, снижение ИЖП начиная с 2004 г. почти прекратилось, глобальная биосфера, по-видимому, уже адаптируется к изменениям климата. Об этом свидетельствует и оценка ИЖП по нелинейному тренду, которая в 2044 г. может составить ИЖП = 0,34. С высокой долей вероятности можно говорить о том, что линейный спад ИЖП закончился, начался этап стабилизации ИЖП в диапазоне 0,30 – 0,40.

Парниковый эффект и глобальное потепление

Как известно, суть парникового эффекта (ПЭ) состоит в том, что атмосферные газы (водяной пар, углекислый газ, метан, закись азота и др.) задерживают часть длинноволнового излучения от поверхности Земли и рассеивают его в разные стороны, в результате чего происходит нагревание атмосферы, причем преимущественно ее нижних слоев. В отсутствие парниковых газов приповерхностная температура воздуха была бы на 33 °С меньше, то есть климат Земли был бы практически непригоден для существования человеческого общества.

В общем случае парниковый эффект можно представить суммой природного и антропогенного компонентов, то есть $ПЭ = ПЭ_{прир} + ПЭ_{антр}$. Естественный ПЭ вызван рядом природных факторов: процессами крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и извержениями вулканов, вследствие чего в атмосферу выбрасывается значительное количество CO_2 и других парниковых газов. Антропогенный ПЭ обусловлен выбросами в атмосферу CO_2 и других газов за счет различных видов человеческой деятельности. До настоящего времени *корректное разделение ПЭ на естественный и антропогенный компоненты не представляется возможным*. Однако, по мнению экспертов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), антропогенный ПЭ доминирует. Главный аргумент – экспоненциальный рост выбросов в атмосферу углекислого газа, который создает ПЭ. Но главным парниковым газом является атмосферный

водяной пар, вклад которого в ПЭ составляет примерно 50 %, еще 25 % приходится на облачность, только 20 % – на углекислый газ и 5 % – на остальные парниковые газы [26].

Несмотря на признание еще в 1990 г. факта, что именно водяной пар является самым сильным парниковым газом [23], с подачи экспертов МГЭИК происходит игнорирование роли влагосодержания атмосферы (ВА) в современных изменениях климата и считается, что ВА является только их откликом. Причина, по которой водяной пар не учитывается как климатический фактор, состоит в том, что «*прямые выбросы водяного пара от антропогенной деятельности создают пренебрежимо малый вклад в радиационный форсинг*» [22]. Именно антропогенная ангажированность является лейтмотивом всей деятельности экспертов МГЭИК [10]. По их мнению, только человеческая деятельность влияет на современные колебания климата и ничего более. В последнем Пятом отчете МГЭИК [21] делается вывод: «*в высшей степени вероятно (extremley likely, 95–100 %), что влияние человека является доминирующей причиной наблюдаемого потепления с середины XX столетия*».

С этим трудно согласиться. Действительно, изменения ВА в соответствии с уравнением глобального атмосферного баланса влаги определяются разностью глобальных величин испарения и осадков или в первом приближении разностью испарения и осадков над Мировым океаном. Поэтому именно процессы взаимодействия океана с атмосферой, формирующие изменчивость составляющих вертикального влагообмена, являются главными факторами формирования межгодовых колебаний ВА, в т. ч. его тренда. Через ПЭ влагосодержание может оказывать воздействие на климатические процессы. Поскольку изменения ВА не вписываются в антропогенную деятельность, то эксперты МГЭИК вынуждены их игнорировать.

Рассмотрим степень взаимосвязи влагосодержания атмосферы над Мировым океаном ($ВА_{МО}$) с другими глобальными характеристиками системы «океан – атмосфера»: температурой воздуха приводного слоя ($ТВ_{МО}$), температурой поверхностного слоя воды ($ТПО_{МО}$) и испарения ($Е_{МО}$) [12]. Все перечисленные характеристики усреднялись во времени (1 год) и по пространству (Мировой океан в целом). В табл. 2 представлены уравнения трендов, оценки коэффициентов детерминации и индекса тренда для характеристик системы «океан – атмосфера» за период 1988–2012 гг. Введение индекса тренда позволяет определить сравнительную значимость трендов для характеристик, имеющих разную размерность. Он представляет собой отношение размаха тренда к его среднему значению и выражается в процентах, то есть

$$I_{тр} = a_1 n \,/\, 100 X_{ср},$$

где a_1 – угловой коэффициент тренда; n – длина временного ряда (n = 25 лет); $X_{ср}$ – среднее значение тренда.

По сути, индекс тренда – некий аналог коэффициента вариации, используемого для сравнения изменчивости характеристик, имеющих разную размерность. При этом на индекс тренда накладываются те же ограничения, что и на коэффициент вариации. Интерпретация индекса вытекает из определения тренда. Если, например, индекс одного тренда превышает индекс другого вдвое, то это означает,

что скорость изменения данной характеристики превышает скорость изменения другой характеристики тоже вдвое.

Таблица 2

Оценки уравнений трендов, коэффициентов детерминации и индекса тренда для характеристик системы «океан – атмосфера» за период 1988–2012 гг. [12]

Характеристика	Уравнение тренда	Коэффициент детерминации	Индекс тренда, % $a_1 n/100X_{ср}$
$ВА_{МО}$	0,0333 t + 27,94	R^2 = 0,57	2,93
$ТВ_{МО}$	0,0091 t + 18,59	R^2 = 0,45	1,22
$ТПО_{МО}$	0,0111 t + 19,98	R^2 = 0,58	1,38
$Е_{МО}$	0,0845 x + 118,05	R^2 = 0,13	1,77

Все тренды, указанные в табл. 2, являются значимыми по критерию Стьюдента при уровне значимости α = 0,05. При этом максимальный коэффициент детерминации отмечается для $ТПО_{МО}$, а наименьший – для испарения. Индекс тренда максимален для влагосодержания атмосферы и более чем в 2 раза превышает индекс для ТПО и ТВ. Данный результат представляется очень важным, ибо он опровергает вывод экспертов МГЭИК о том, что «*увеличение концентрации водяного пара является ключевым следствием, но не причиной процесса глобального потепления и, следовательно, полностью обусловлено положительной обратной связью между ними*».

Обратимся к рис. 2, на котором представлена зависимость средних годовых значений $ВА_{МО}$ от аномалий глобальной температуры воздуха ($\Delta ТВ_{гл}$) за период 1988–2012 гг., по данным [27], которая свидетельствует об очень высокой линейной корреляции между ними (r = 0,95). В принципе, несложно рассчитать как прямое уравнение регрессии $ВА_{МО} = f_1(\Delta ТВ_{гл})$, так и обратное $\Delta ТВ_{гл} = f_2(ВА_{МО})$, которые будут иметь одинаковую точность. Линейное уравнение регрессии между $ВА_{МО}$ и $\Delta ТВ_{гл}$, рассчитанное методом наименьших квадратов, имеет вид

$$ВА_{МО} = 28{,}20 + 2{,}22\ \Delta ТВ_{гл}. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации этого уравнения R^2 = 0,90, а средняя квадратическая ошибка оценки ВА составляет $\sigma_{ВА}$ = 0,10 мм, то есть является малой величиной. Из данной формулы видно, что при повышении $\Delta ТВ_{гл}$ на 1 градус $ВА_{МО}$ растет на 2,22 мм, или на 7,8 %.

Нетрудно показать, что температура воздуха, теплосодержание океана, испарение, ВА, концентрация CO_2, ледовитость полярных районов, изменения альбедо, уровень Мирового океана – это процессы, которые протекают согласованно, и изменения одного из них через обратные связи в системе «океан – атмосфера» вызывают изменения других. Поэтому *формирование глобального потепления обусловлено не антропогенной деятельностью, а процессами крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой, и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей, причем положительные связи преобладают*. Главная роль в этом принадлежит обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием. При этом сложно утверждать, что является причиной, а что следствием.

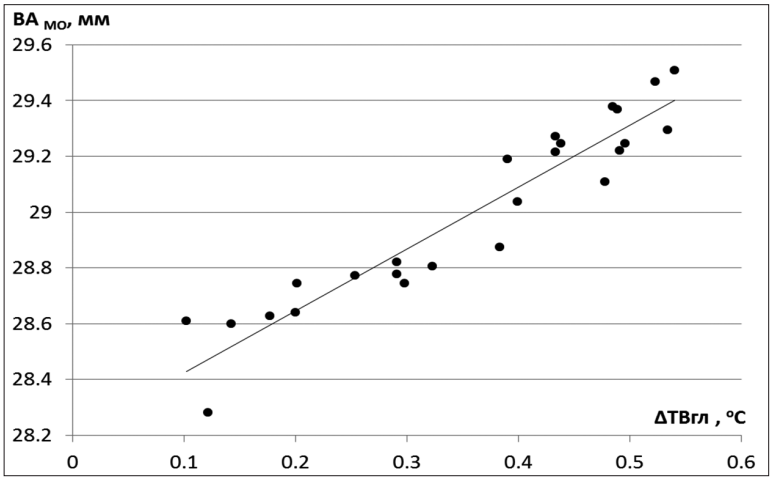

Рис. 2. График статистической связи между средними годовыми значениями $ВА_{МО}$ и $\Delta ТВ_{гл}$ за период 1988–2012 гг. (по данным [10])

С одной стороны, с повышением глобальной температуры воздуха происходит некоторый рост ВА, с другой – рост ВА через парниковый эффект ведет к росту температуры. В реальных условиях рост концентрации CO_2 и ВА происходит согласованно и в одной фазе, поэтому их воздействие на $ТВ_{гл}$ осуществляется совместно. Отсюда следует определенный дуализм в «поведении» атмосферного водяного пара, который является не только откликом на изменения климата, но и в определенной степени климатообразующим фактором. Однако если бы не было дополнительного углекислого «покрывала» в атмосфере, формирующегося за счет антропогенной деятельности, то климатическая система испытывала бы циклические колебания. По сути, *рост концентрации CO_2 – это фактор усиления обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием, не допускающий движения климатической системы в сторону похолодания*.

Важным следствием глобального потепления является разбалансированность климатической системы, сопровождающаяся быстрым ростом аномальных условий опасных гидрометеорологических явлений (ОГЯ), наносящих значительный эколого-экономический ущерб. Например, общий ущерб мировой экономике в 2010 г. за счет ОГЯ по расчетам швейцарской страховой компании Swiss Re составил 218 млрд долл. Согласно мировым статистическим данным количество опасных природных чрезвычайных ситуаций возрастает ежегодно в среднем на 4,0 %, а экономические потери от них – на 10,4 %.

Как известно, на верхней границе атмосферы радиационный баланс равен нулю, то есть приток энергии от Солнца равен его оттоку в космос. Однако вследствие ПЭ нижние слои атмосферы нагреваются, а нижняя стратосфера, наоборот, охлаждается. В результате происходит рост вертикального градиента плотности воздуха, усиливающий вертикальные движения в атмосфере, которые носят преимущественно турбулентный характер. Одновременно с этим из-за повышения

приповерхностной температуры воздуха усиливается конвекция. Дополнительно следует учитывать и фактор урбанизации общества. Как известно, города являются «островами тепла», температура воздуха в них, особенно в зимний период, выше, чем на окружающих территориях. Это создает условия для подъема более теплого воздуха вверх, то есть происходит усиление конвекции.

В результате действия указанных процессов возрастает турбулентность атмосферы, проявляющаяся в виде синоптических и мезомасштабных вихрей (крупномасштабные наводнения, засухи, тропические ураганы, тайфуны, штормовые циклоны, смерчи, торнадо и т. п.), наблюдающихся в разных странах мира. Дополнительным фактором, способствующим росту этих процессов, является уменьшение меридионального градиента плотности воздуха «экватор – полюс», обусловленного быстрым ростом температуры воздуха в северной полярной области. Кроме того, в последние десятилетия отмечается ослабление североатлантического и тихоокеанского колебаний. Вследствие этого происходит ослабление зональной и усиление меридиональной циркуляции в Северном полушарии. *Усиление меридиональной циркуляции – это важнейшее условие формирования крупных погодных аномалий*.

Рассмотренные выше процессы действуют в одном направлении, усиливая мощность и частоту различных погодно-климатических аномалий. Например, для территории России только за 17 лет (1996–2012 гг.) рост ОГЯ происходил со скоростью 188/10 лет, в результате чего их число увеличилось более чем в 2 раза [2]. По данным работы [7] за период 1991–2014 гг. их рост составлял 15 явлений в год. Распределение суммарного числа опасных явлений и неблагоприятных условий погоды по их видам с использованием данных [18] представлено на рис. 3.

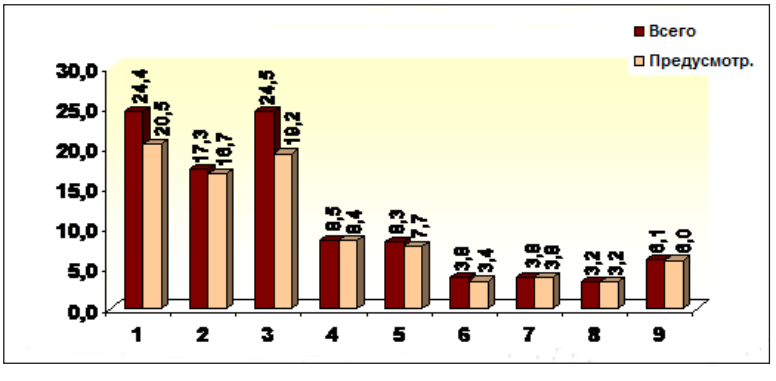

Рис. 3. Доля числа случаев опасных гидрометеорологических явлений по их видам за период 1991–2014 гг. [7], где *1* – сильный ветер, ураган, шквал, смерч, пыльные бури; *2* – сильная метель, сильный снег, налипание мокрого снега, гололед, гололедица; *3* – сильный дождь, продолжительный дождь, ливень, град, гроза; *4* – мороз, заморозки, сильная жара, резкое повышение/понижение температуры; *5* – весеннее половодье, дождевой паводок, наводнение, нагонные явления; *6* – лавина, сель; *7* – засуха атмосферная/почвенная, суховей; *8* – чрезвычайная пожарная опасность; *9* – сильный туман, тягун, сильное волнение и др.

Из рис. 3 видно, что более 24 % всех явлений приходится на первую группу, состоящую из пяти характеристик (сильный ветер, ураган, шквал, смерч, пыльные бури), и третью группу (сильный дождь, продолжительный дождь, ливень, град, гроза). При этом характеристики и явления указанных двух групп наиболее трудно прогнозируемы (оправдываемость прогнозов составляет 83,5 и 78,0 % соответственно). Если рассматривать виды экономической деятельности, понесшие значительные социально-экономические потери от ОГЯ на территории России, то с большим отрывом лидируют электроэнергетика, сельское хозяйство и автотранспорт [7]. Достаточно очевидно, что при продолжающихся темпах глобального потепления будет происходить дальнейший рост мощности и частоты погодно-климатических аномалий, в т. ч. экстремальных аномалий.

Обмен углекислым газом между океаном и атмосферой

Мировой океан является самым крупным резервуаром углерода на планете: его запасы более чем в 50 раз превосходят запасы углерода в атмосфере и в 15 раз – запасы углерода в экосистемах суши. В среднем Мировой океан поглощает 80 млрд т $C \cdot год^{-1}$, а выделяет в атмосферу 78,4 млрд т $C \cdot год^{-1}$ [21], то есть он является активным поглотителем углекислого газа, тем самым ослабляя антропогенный парниковый эффект, обусловленный выбросами от сжигания ископаемого топлива и производства цемента, которые составляют примерно 8,3 млрд т $C \cdot год^{-1}$ [21].

В последние годы появились новые оценки результирующего потока CO_2 на границе раздела «океан – атмосфера». В обзорной работе [25] приводятся климатологические оценки годового потока CO_2, полученные как в результате прямых измерений, так и на основе математического моделирования углеродного цикла. Разброс оценок CO_2 находится в пределах от 1,8 до 2,4 Pg $C \cdot год^{-1}$ при среднем значении 2,1 Pg $C \cdot год^{-1}$ (Pg $C \cdot год^{-1} = 10^{15}$ г $C \cdot год^{-1} = 1$ млрд т $C \cdot год^{-1} \approx 0{,}25$ моль $C \cdot м^{-2} \cdot год^{-1}$). Однако межгодовая изменчивость потока CO_2, особенно в глобальном масштабе, исследована значительно хуже, поскольку до последнего времени отсутствовали обобщенные систематические данные за длительный период времени со всей акватории Мирового океана. Такая возможность появилась в результате создания глобального архива потоков углекислого газа в узлах географической сетки с пространственным разрешением 4° широты × 5° долготы с 1982 г., находящегося в свободном доступе на сайте AOML NOAA (http://cwcgom.aoml.noaa.gov/erddap/griddap/aomlcarbonfluxes.graph) [20]. На основе данного архива в работе [5] был выполнен расчет глобального результирующего потока CO_2 за период 1982–2011 гг. (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что рассматриваемый период можно разделить на два относительно однородных промежутка времени с разнонаправленными тенденциями: первому из них (1982–1996 гг.) свойственно возрастание потока CO_2 из атмосферы в океан, в то время как второму (1997–2011 гг.) – уменьшение потока CO_2. В первом случае величина тренда составляет $Tr = -0{,}016$ млрд т $C \cdot год^{-2}$, причем тренд описывает 24 % дисперсии исходного ряда, во втором случае $Tr = 0{,}022$ млрд т $C \cdot год^{-2}$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0{,}39$, то есть оценки величин тренда довольно близки друг к другу. Если в ближайшие годы указанная тенденция сохранится, то 1997 г. можно будет считать переломным, после

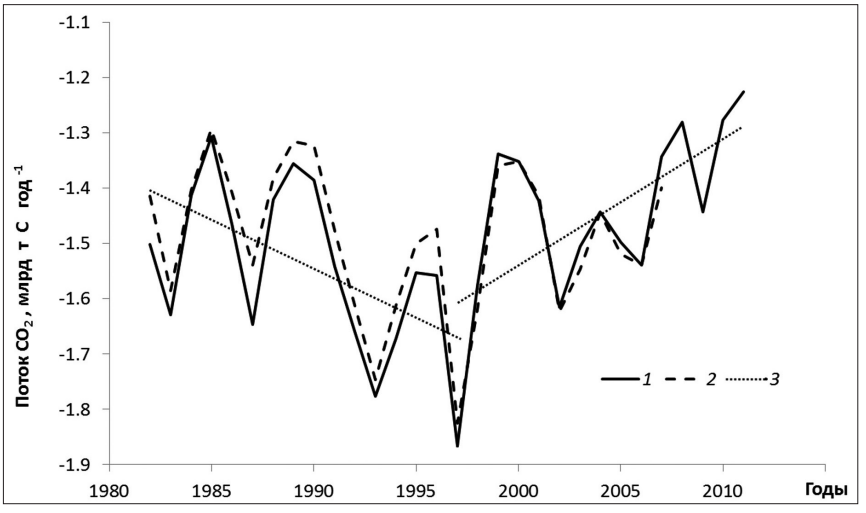

Рис. 4. Межгодовой ход результирующего глобального потока CO_2 на границе раздела «океан – атмосфера» за период 1982–2011 гг. в млрд т С·год$^{-1}$: *1* – по данным [5]; *2* – по данным [24]; *3* – линейный тренд

которого *Мировой океан начинает превращаться в климатической системе из стабилизатора парникового эффекта в его ускоритель*.

Как известно, наиболее важным фактором, определяющим не только величину, но и направление потока CO_2 на поверхности океана, является температура поверхности океана (ТПО). От ТПО почти полностью зависит растворимость углекислого газа в морской воде. С повышением температуры воды растворимость CO_2 снижается, а с понижением – повышается. От пространственного распределения температуры зависит жизнедеятельность морских организмов, за счет которой возникают мощные источники и стоки CO_2. Их действие обусловлено процессами поглощения CO_2 при фотосинтезе и, наоборот, его выделением при окислении органического вещества.

В связи с этим в работе [6] осуществлена оценка влияния ТПО на обмен углекислым газом с атмосферой в различных пространственно-временных масштабах. Для этого использовались спутниковые суточные данные о ТПО с 1 января 1982 г. по 31 декабря 2012 г. в узлах географической сетки 0,25 × 0,25° из архива NOAA NCDC OISSTv.2 (http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.OISST/.version2/), важным достоинством которого является однородность временных рядов и высокая оперативность их получения. Суточные данные о ТПО вначале усреднялись за календарный месяц, а затем – по 4-градусным широтным зонам Мирового океана с учетом площадей.

На рис. 5 приводится распределение выборочных коэффициентов корреляции *r* между среднеширотными среднегодовыми значениями ТПО и потоком CO_2 на границе раздела «океан – атмосфера». Нетрудно видеть, что величина коэффициента корреляции *r* и его знак сильно варьируют в зависимости от широты. Если для тропических и субтропических широт обоих полушарий в основном

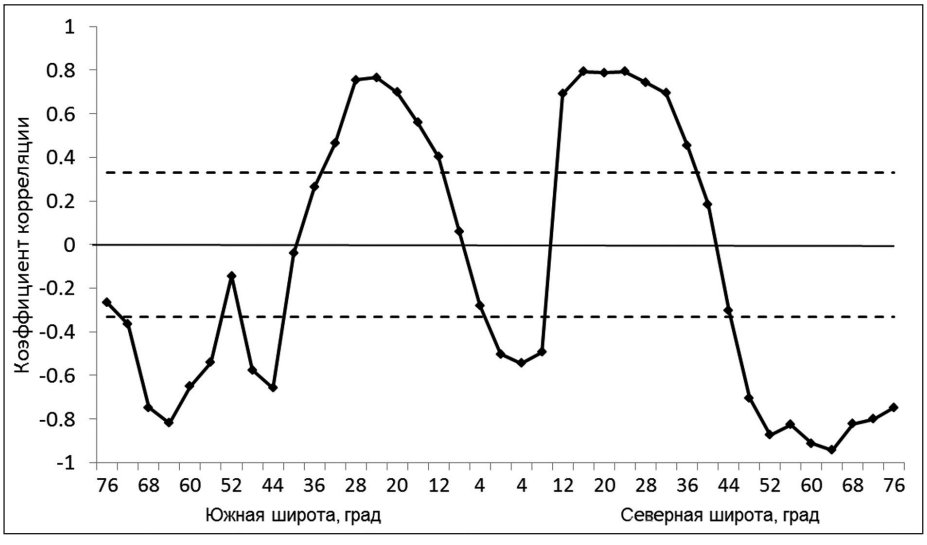

Рис. 5. Распределение выборочных коэффициентов корреляции *r* между среднеширотными среднегодовыми значениями ТПО и потоком CO_2 на границе раздела «океан – атмосфера», где пунктирные линии обозначают уровень значимости *r* при α = 0,05 ($|r_{кр}| = 0,35$)

характерны высокие положительные коэффициенты корреляции (*r* достигает 0,8), то в экваториальном поясе, а также в умеренных и высоких широтах коэффициенты корреляции имеют уже отрицательный знак. Наибольшие (по абсолютной величине) отрицательные оценки *r* отмечаются в приполярных широтах. Абсолютный максимум наблюдается в широтной зоне 62–66° с. ш. (*r* = –0,94).

Учитывая знакопеременный характер потока CO_2, в табл. 3 представлена интерпретация значимых коэффициентов корреляции. В целях простоты они рассматриваются относительно повышения ТПО. Как видно из табл. 3, реакция потоков углекислого газа на границе раздела «океан – атмосфера» на изменение ТПО имеет противоположные тенденции. С одной стороны, в умеренных и высоких широтах обоих полушарий при росте ТПО происходит увеличение потока CO_2

Таблица 3

Интерпретация значимых корреляционных связей среднеширотных среднегодовых значений ТПО и потока CO_2 на границе раздела «океан – атмосфера»

Широтная зона	Изменение ТПО	Изменение потока CO_2
78–42° с. ш.	Рост ТПО	Увеличение потока CO_2 в океан
38–14° с. ш.	Рост ТПО	Уменьшение потока CO_2 в океан
6° с. ш. – 10° ю. ш.	Рост ТПО	Уменьшение потока CO_2 в атмосферу
10–18° ю. ш.	Рост ТПО	Увеличение потока CO_2 в атмосферу
18–38° ю. ш.	Рост ТПО	Уменьшение потока CO_2 в океан
42–78° ю. ш.	Рост ТПО	Увеличение потока CO_2 в океан

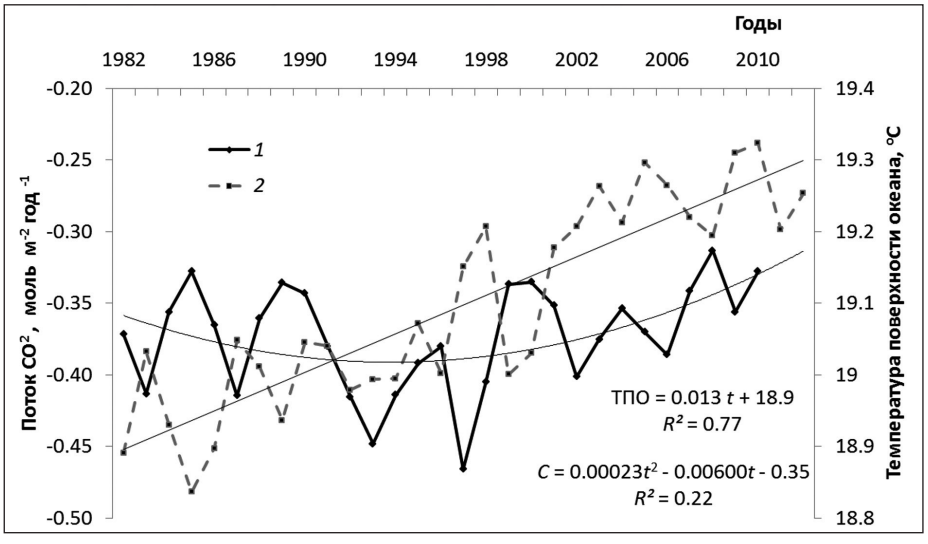

Рис. 6. Межгодовой ход результирующего потока CO_2 на границе раздела «океан – атмосфера» (*1*) и глобальных значений ТПО (*2*) за период 1982–2011 гг. Приведены уравнения тренда, где *t* – время

в океан, а в экваториальной зоне 6° с. ш.–10° ю. ш. – уменьшение потока CO_2 в атмосферу. С другой – в тропических и субтропических широтах при росте ТПО поток CO_2 в океан уменьшается, а в зоне 10–18° ю. ш. поток CO_2 в атмосферу увеличивается. Достаточно очевидно, что распространенное *мнение о безусловном усилении поглощения CO_2 океаном при уменьшении температуры воды не соответствует действительности* [6]. Связь между CO_2 и температурой воды носит значительно более сложный характер. Особенно неожиданным является рост CO_2 при повышении ТПО в высоких широтах.

На рис. 6 представлен межгодовой ход глобальных значений ТПО и результирующего потока CO_2 на границе раздела «океан – атмосфера». Нетрудно видеть, что между этими рядами отмечается сложный характер связи. Так, если глобальному ряду ТПО присущ мощный линейный тренд (коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}77$), показывающий рост ТПО со скоростью 0,013 °С·год$^{-1}$, то потоку CO_2 – нелинейный тренд, в соответствии с которым до 1997 г. $FCO_{2(gl)}$ из атмосферы в океан увеличивался, а после него стал интенсивно уменьшаться. Если же рассматривать эти временные ряды в отклонениях от тренда, то проявляется отчетливая тенденция их противоположных колебаний (коэффициент корреляции $r = -0{,}49$). При этом положительной аномалии ТПО соответствует усиление поглощения CO_2 океаном, что связано с особенностями межгодовой изменчивости ТПО и потока CO_2 в умеренных и высоких широтах обоих полушарий и в экваториальной зоне (см. табл. 3).

Эколого-экономические последствия роста уровня Мирового океана

Важнейшим индикатором глобального климата является уровень Мирового океана (УМО), изменения которого определяют как многие гидродинамические

процессы в самом океане, так и характер его взаимодействия с атмосферой. Известно, что в течение XX в. происходил довольно быстрый рост уровня Мирового океана со скоростью примерно 1,7–1,8 мм/год. Однако в последние три десятилетия на основе альтиметрических данных установлено, что рост УМО заметно повысился и составляет уже 3,2 мм/год.

В РГГМУ впервые разработан комплекс методов долгосрочного прогноза УМО: на длительную перспективу (столетие), на ближнюю перспективу (несколько десятилетий) и на текущий период (несколько лет) [9]. Такое деление обусловлено, с одной стороны, физическими закономерностями колебаний УМО и влиянием на них уровнеформирующих факторов, а с другой – практическими запросами потребителей. На длительную перспективу (на конец XXI в.) предложена простая статистическая модель прогноза УМО. Она основана на использовании результатов моделирования глобальной температуры воздуха с помощью комплекса численных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Основанием для этого послужило наличие хорошо выраженной линейной зависимости глобальных оценок аномалий $ТВ_{гл}$, заимствованных из архива HadCRUT3, и значений УМО, рассчитанных по футшточным (береговым) наблюдениям. Методом наименьших квадратов за период 1960–2005 гг. было рассчитано линейное уравнение регрессии

$$h_{УМО}(\text{мм}) = 221{,}0 + 107{,}1\ \Delta ТВ_{гл}. \qquad (2)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}73$, стандартная ошибка модели $\sigma_{y(x)} = 14{,}7$ мм.

Данное уравнение использовано для оценки возможных изменений УМО в зависимости от изменений глобальной температуры воздуха, соответствующих шести основным сценариям выбросов парниковых газов, принятых в Четвертом, и четырем сценариям в Пятом отчете МГЭИК [21, 22]. Было установлено, что для всех сценариев Четвертого отчета [22] оценки возможного роста УМО по статистической модели имеют очень малые расхождения с результатами численного моделирования климата на основе МОЦАО, но несколько занижены с оценками Пятого отчета [21]. Это связано с тем, что в последнем отчете МГЭИК рост УМО составляет 19,0 см/°С, а в предыдущем отчете – только 8,9 см/°С. По фактическим данным рост УМО за последние 50 лет составляет 10,7 см/°С. Достоинство статистической модели (2) состоит в том, что она требует минимум исходной информации.

Таблица 4

Возможные оценки изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха и уровня Мирового океана на конец XXI в. (2090−2099 гг.) по сравнению с концом XX в. (1980–1999 гг.)

Сценарий выбросов СДСВ	Ансамбль из 16 моделей общей циркуляции атмосферы и океана [21]		Статистическая модель (2)
	Вероятный диапазон роста температуры на конец 2090–2099 гг., °С	Вероятный диапазон роста УМО на конец 2090–2099 гг., м	Вероятный диапазон роста УМО на конец 2090–2099 гг., м
RCP2.6	0,3–1,7	0,26–0,55	0,03–0,18
RCP4.5	1,1–2,6	0,32–0,63	0,12–0,28
RCP6.0	1,4–3,1	0,33–0,63	0,15–0,33
RCP8.5	2,6–4,8	0,45–0,82	0,28–0,51

В принципе, приведенные в табл. 4 прогнозы УМО можно рассматривать как «оптимистические», ибо существуют «пессимистические» прогнозы роста УМО, в соответствии с которыми он может повыситься на 1–2 м к концу столетия, если начнет разрушаться ледниковый щит Западной Антарктиды. Но даже реализация «оптимистических» прогнозов грозит громадным ущербом для инфраструктуры прибрежных территорий, где проживают многие сотни миллионов жителей Земли. Вполне возможно, что в зоне возможных наводнений могут оказаться дополнительно от 20 до 300 млн человек. В частности, в Англии к 2080 г. в 5 раз больше людей окажутся под влиянием наводнений от штормовых нагонов при росте морского уровня всего на 38 см по сравнению с 1990 г. Повышение морского уровня имеет несколько прямых и косвенных неблагоприятных последствий, которые можно разделить на три (экономические, экологические и социальные) группы (табл. 5), причем косвенные последствия могут усиливать прямые последствия в несколько раз [13]. Изучение их в глобальном и региональном масштабах представляет важнейшую задачу. Достаточно подробно эколого-экономические последствия повышения УМО в XXI в. рассматриваются в работе [13].

Таблица 5

Классификация неблагоприятных последствий от роста морского уровня [13]

Группа	Прямые последствия	Косвенные последствия
Экономические	Снижение эффективности прибрежной инфраструктуры, построенной над водой (доки, пирсы, дамбы и т. п.) вследствие близости к уровню воды, или ее затопление. Ухудшение качества земель вследствие интрузии соленых вод	Нарушение нормального режима хозяйственной деятельности вне зоны разрушений из-за нарушения функционирования энергетических, транспортных и других коммуникаций и предприятий-смежников, а также из-за непредвиденного отвлечения средств на восстановительные работы
Экологические	Затопление низменных прибрежных участков суши, пляжей, в т. ч. практически постоянное затопление участков суши, которые уходили под воду только во время приливов, а также повышение уровня грунтовых вод. Вторжение соленой воды как в пресноводные эстуарии, так и в прибрежные водоносные слои, угрожающее водообеспеченности населения прибрежных районов. Усиление эрозии береговых утесов вследствие проникновения в них морской воды. Сокращение функциональной зоны заболоченных земель, которые служили в качестве защиты от наводнений и фильтрами для грунтовых вод. Повышение интенсивности и частоты крупных штормовых нагонов, не без оснований считающееся одним из самых опасных последствий изменения климата	Загрязнение окружающей среды при разрушении стихией предприятий, на которых используются или производятся опасные для здоровья людей и природы материалы
Социальные	Вынужденная миграция населения, появление так называемых климатических беженцев	Потеря доверия людей к способности руководства защитить их от бедствий и усиление социальных разногласий

Из анализа отрицательных последствий роста УМО следует, что в большей степени пострадают такие отрасли хозяйственной деятельности, как туризм, сельское хозяйство, транспортное сообщение, а также рекреация, аквакультура. Под сильной угрозой окажутся прибрежные среды обитания и экологическая обстановка в целом.

Указанные последствия повышения морского уровня крайне неблагоприятны в силу следующих фактов. В мире приблизительно 2 млн км^2 территорий находятся ниже 2 м над средней верхней границей прилива. Именно эта пограничная зона между землей и океаном характеризуется особенно разнообразными экосистемами и именно ее предпочитает для своей жизни человек. По данным на 1995 г., около 60 млн человек проживали на землях, находящихся менее 1 м выше уровня моря и 275 млн – менее 5 м. Восемь из десяти крупнейших городов мира находятся на низменных прибрежных территориях, в т. ч. Нью-Йорк и Токио, а темпы роста численности населения в таких зонах в два раза превышают среднемировой показатель.

К концу XXI в. в прибрежных зонах, расположенных не выше 1 м над уровнем моря, будут проживать уже 130 млн, а в зонах не выше 5 м – 410 млн человек. Например, в США в прибрежной зоне, составляющей около 17 % всей территории страны, проживает более половины ее населения. В 2003 г. примерно 153 млн человек (53 % населения) насчитывалось в 673 прибрежных округах США, увеличившись с 1980 г. на 33 млн человек.

Что касается Российской Федерации, то в приморских районных муниципальных образованиях проживает 12,6 млн человек (данные на 01.01.2007 г.), что составляет примерно 9 % всего населения страны. Наибольшее число людей, живущих в низменных районах, приходится на следующие страны: Китай, Индия, Бангладеш, Вьетнам, Индонезия, Япония, Египет, США, Таиланд и Филиппины. При этом наибольшая доля населения, проживающего в низменных районах, сосредоточена в таких странах, как Суринам, Голландия, Багамы, Вьетнам, Гайана, Бангладеш, Джибути, Белиз, Египет и Гамбия. Повышение морского уровня только на 40 см в Бенгальском заливе приведет к затоплению 11 % прибрежной зоны Бангладеш и возникновению 7–10 млн беженцев. К сожалению, многие страны, наиболее чувствительные к повышению уровня моря, не имеют достаточных ресурсов для подготовки к его последствиям.

Заключение

Если исходить из понятия ГЭК, то можно определенно утверждать, что он есть и углубляется. Выше было показано, что ГЭК зависит от большого числа факторов разнообразной природы, которые можно объединить в четыре основные группы: экономико-социальные, климатические, геофизические и антропогенные. Естественно, они неравнозначны и действуют на разных масштабах: от локального до глобального. Однако построить какую-то иерархическую систему факторов по степени их влияния на человеческое общество практически невозможно. У специалистов в области экологии на этот счет разные, подчас диаметрально противоположные, суждения.

Тем не менее можно с уверенностью утверждать, что глобальное потепление, обусловленное в основном действием естественных и частично антропогенных

факторов, оказывает сильное воздействие на все стороны жизни человеческого общества и, несомненно, на формирование и развитие ГЭК. Индикатором ГЭК может служить индекс живой планеты, который свидетельствует о стремительном сокращении биологического разнообразия, то есть о невосполнимой гибели многих животных и растений. За период 1970–2010 гг. он уменьшился более чем вдвое. Если ИЖП будет уменьшаться такими же темпами, то уже в 2044 г. может наступить экологический коллапс, когда ИЖП станет равным нулю. Впрочем, при условии адаптации глобальной биосферы к внешним условиям в ближайшие десятилетия более реальной представляется определенная стабилизация ИЖП в диапазоне 0,30–0,40.

Достаточно очевидно, что ПЭ является основным фактором современных изменений климата, причем корректное разделение ПЭ на естественный и антропогенный компоненты не представляется возможным. При этом формирование глобального потепления обусловлено не антропогенной деятельностью, а процессами крупномасштабного взаимодействия между океаном и атмосферой и регулируется системой положительных и отрицательных обратных связей с преобладанием положительных связей. Главной является обратная положительная связь между температурой воздуха и его влагосодержанием. Роль углекислого газа состоит в том, что рост его концентрации представляет фактор усиления обратной положительной связи между температурой воздуха и влагосодержанием, не допускающий движения климатической системы в сторону похолодания.

Существенное влияние на ПЭ оказывает Мировой океан, который является активным поглотителем углекислого газа, тем самым ослабляя антропогенный парниковый эффект. Однако начиная с 1997 г. наметилась тенденция к уменьшению поглощения углекислого газа Мировым океаном и это не может не тревожить. Показан сложный знакопеременный характер влияния ТПО на обмен CO_2 с атмосферой, причем распространенное мнение о безусловном усилении поглощения CO_2 океаном при уменьшении температуры воды не соответствует действительности.

В настоящее время УМО растет со скоростью 3,2 мм/год, причем очень вероятно его ускорение. Поэтому к концу столетия по сравнению с его началом он может увеличиться на 50 см и даже более. Это грозит громадным ущербом для инфраструктуры прибрежных территорий, где проживают многие сотни миллионов жителей Земли, и переселением десятков миллионов человек в глубь территории. Возможный ущерб от прямых и косвенных неблагоприятных последствий роста УМО оценить нереально, но он будет исчисляться в триллионах долларов.

Литература

1. *Биоразнообразие* и изменение климата. Международный день биоразнообразия. – Секретариат Конвенции о биологическом разнообразии, 2007. – Интернет-ресурс. Режим доступа: http://www.biodiversity.ru/programs/climate_and_biodiversity/pub/biodiversity_and_climate.pdf.
2. *Второй* оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1003 с.
3. *Доклад* WWF «Живая планета 2016» // WWF. 2016. Living Planet Report 2016: Summary. WWF, Gland, Switzerland. 36 с.

4. *Доклад* «Живая планета – 2008». – WWF Intl / WWF России, 2008. – 48 с. – Интернет-ресурс. Режим доступа: http://www.wwf.ru/resources/publ/book/311/.
5. *Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Образцова А.А.* Пространственно-временные изменения потока CO_2 в системе океан – атмосфера // Изв. РГО. 2012. Т. 144. Вып. 5. – С. 27–36.
6. *Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Гордеева С.М.* О влиянии температуры поверхности океана на обмен углекислым газом с атмосферой // Океанология. – 2015. Т. 5, № 1. – С. 16–25.
7. *Коршунов А.А., Шаймарданов В.М., Шаймарданов М.З.* Об организации обслуживания потребителей данными об опасных гидрометеорологических явлениях и неблагоприятных условиях погоды // Учен. зап. РГГМУ. – 2017. № 46. – С. 100–110.
8. *Кравчук М.А., Краснов Ю.И., Малинин В.Н.* Глобальный экологический кризис: стратегия выживания // Общество. Среда. Развитие. – 2009. № 1. – С. 194–205.
9. *Малинин В.Н.* Уровень океана: настоящее и будущее. – СПб.: РГГМУ, 2012. – 260 с.
10. *Малинин В.Н.* Влагосодержание атмосферы и парниковый эффект // Общество. Среда. Развитие. – 2014. № 3. – С. 139–145.
11. *Малинин В.Н.* Гольфстрим и климат Европы // Общество. Среда. Развитие. – 2012. № 1. – С. 214–220.
12. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Изменчивость влагосодержания над океаном по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. – С. 3–11.
13. *Малинина Ю.В.* К оценке возможного ущерба от возможного повышения уровня океана в XXI столетии // Учен. зап. РГГМУ. – 2010. № 14. – С. 162–176.
14. *Орлеанская Е.С.* Изменение глобальной экосистемы в период потепления климата // Общество. Среда. Развитие. – 2011. № 1. – С. 223–227.
15. *Реймерс Н.Ф.* Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы. – М.: Россия молодая, 1994. – 366 с.
16. *Фрумин Г.Т.* Глобальные экологические проблемы: путь к катастрофе или миф? // Общество. Среда. Развитие. – 2009. № 3. – С. 101–113.
17. [Электронный ресурс]. http://studme.org/54478/ekonomika/mezhdunarodnye_ekonomicheskie_otnosheniya free.
18. *Чрезвычайные* ситуации в России, обусловленные погодными условиями. [Электронный ресурс] URL: http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/150-chs-v-rosii.
19. *Bjorn Lomborg*. The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World. – Cambridge : Cambridge University Press, 2001. – 540 p.
20. *ERDDAP:* AOML Monthly Global Carbon Fluxes dataset. – URL: http://cwcgom.aoml.noaa.gov/erddap/ griddap/aomlcarbonfluxes.graph, free.
21. *IPCC.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / *Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M*. – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.
22. *IPCC.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / *Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)*. – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. – 996 p.
23. *IPCC.* Climate Change 1990: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group I. / *Edited by J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums*. – Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia: Cambridge University Press, 1990. – 410 p.
24. *Park G.*-H.*, Wanninkhof R., Doney S.C. et al*. Variability of global net seaair CO_2 fluxes over the last three decades us ing empirical relationships // Tellus. 2010. № 62B (5). P. 352–368.
25. *Sabine C.L., Feell R.A*. The oceanic sink for carbon di oxide // Greenhouse Gas Sinks / Eds. Reay D. et al. – UK, Oxfordshire: CABI Publishing, 2007. – P. 31–49.
26. *Schmidt G.A., Ruedy R.A., Miller R.L., Lacis A.A*. Attribution of the present-day total greenhouse effect // Journal of Geophysical Research. – 2010, vol. 115. – P. 1–6. – D20106, doi:10.1029/2010JD014287.
27. *Temperature* data (HadCRUT3 and CRUTEM3) / Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK. – Интернет-ресурс. Режим доступа: http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/ , free.

УДК [502.211+008]:502.131.1:502.2:[17+37.016]

К.М. Петров

БИОСФЕРА И ЦИВИЛИЗАЦИЯ: ПРОБЛЕМЫ КОЭВОЛЮЦИИ

Санкт-Петербургский государственный университет, k.petrov@spbu.ru

К.М. Petrov

THE BIOSPHERE AND CIVILIZATION: PROBLEMS OF COEVOLUTION

В статье обсуждаются особенности экологических вызовов существованию цивилизации, методологические основы экологии Земли (геоэкологии), проблемы коэволюции общества и биосферы. Отмечается, что для устойчивого развития необходимо совершенствовать экологию культуры в целях воспитания экологической этики. Предложенные концепции используются в области экологического образования.

Ключевые слова: *экологические вызовы, устойчивое развитие, геоэкология, экология культуры, экологическая этика.*

The article discusses the features of environmental challenges to the existence of civilization, the methodological foundations of geoecology, problems of coevolution of society and biosphere. It is noted that for sustainable development it is necessary to improve the ecology of culture with the aim of nurturing environmental ethics. The proposed concept used in the field of environmental education.

Keywords*: environmental challenges, sustainable development, geoecology, culture ecology, environmental ethics.*

Введение

Возраст биосферы соотносится с геологическим возрастом Земли, наружные оболочки которой претерпевали изменения в результате средообразующих функций живого вещества. Благодаря этим функциям литосфера, гидросфера, атмосфера и биосфера образовали единое целое [2]. По этой причине в начале XX в. известный русский микробиолог С.М. Виноградский [5] назвал Землю суперорганизмом, а в 1980-е гг. английский физик Д.Ж. Лавлок [17] сформулировал концепцию Геи.

Существование цивилизации исчисляется лишь несколькими тысячелетиями. За это время в результате антропогенной деятельности состояние наружных оболочек Земли, определяющих условия существования жизни, существенно изменилось. Однако эмоциональная оценка условий жизни присуща только человеческому разуму, воспринимающему эти изменения как экологическую катастрофу. Борьба за существование и естественный отбор составляет основу эволюционного процесса. Возрастание темпов замены биосферных процессов техногенными в ходе интенсификации экономического развития приводит к замене биосферы техносферой, что таит угрозу экологической катастрофы для цивилизации.

Через 20 лет после ставшей исторической Первой конференции на высшем уровне под названием «Планета Земля» (Рио-де-Жанейро, 3–14 июня 1992 г.)

в том же Рио-де-Жанейро 20–22 июня 2012 г. прошла конференция ООН по устойчивому развитию «Рио + 20» с девизом «Будущее, которое мы хотим», выдвинувшая в качестве условия устойчивого развития новую концепцию – «зеленая» экономика. Последняя понимается как система видов экономической деятельности, связанной с производством, распределением и потреблением товаров и услуг, которая должна привести к повышению благосостояния населения, не подвергая его при этом экологическим рискам [9, 15].

При разработке стратегии устойчивого развития необходимо учитывать, что сущность цивилизации включает в себя два феномена: культуру материальную и культуру духовную. В декларациях ООН начиная с 1992 г. речь идет, по сути дела, об опоре только на научно-технический прогресс как условие развития материальной основы общества потребления. Однако следует иметь в виду, что для решения проблемы устойчивого развития не менее важно привлечение методологии естественных наук и мировоззренческих аспектов взаимодействия общества и природы.

В статье обсуждаются особенности экологических вызовов существованию цивилизации, методологические основы экологии Земли (геоэкологии), проблемы коэволюции общества и природы и натурфилософские ориентиры в воспитании экологической этики.

Экологические вызовы и концепция геоэкологии

Наряду с научным анализом проблем взаимодействия общества и природы в средствах массовой информации (СМИ) поднялась волна алармизма, предрекающего гибель не только человечества, но и биосферы в целом. Альтернативные положения сформулируем в виде тез и антитез. В качестве тезы приводится высказывание, завоевавшее популярность. Антитеза содержит противоположное мнение, которое требует обоснования.

Теза. *Антропогенное воздействие на биосферу может привести к глобальной экологической катастрофе, гибели всего живого на Земле.*

Антитеза. *Антропогенное воздействие на природу может угрожать устойчивому развитию цивилизации, изменения в биосфере при этом не будут означать ее гибели.*

В современной науке возрос интерес к теории катастроф, начало которой было заложено трудами Ж. Кювье. Природные катастрофы в истории Земли теперь рассматриваются как непременное сопровождение процессов эволюции. Изменения условий существования, вызываемые космическими или земными факторами, неоднократно становились причиной массовой гибели организмов, но вместе с тем они вызывали усиленные мутации и вспышки видообразования. Таким «криогенным толчком» видообразования явилась ледниковая эпоха в плейстоцене, закончившаяся всего 12–10 тыс. лет назад. Она обогатила биоту тундровых, таежных, степных и других ландшафтов. С ней связано обособление из животного мира *Человека разумного*.

Теза о глобальной экологической катастрофе, связанной с антропогенным воздействием и гибелью всего живого на Земле, не является истинной. При существующих космических предпосылках в живом веществе биосферы заложены

огромные резервы для самовосстановления и саморазвития. Что же касается людей, то здесь уже действуют разнообразные факторы, ограничивающие их численность. Важно добиться, чтобы этот процесс осуществлялся гуманными средствами и управлялся в интересах устойчивого развития.

Теза. *Антропогенный пресс охватывает всю биосферу и привносит качественно новые факторы воздействия на биоту.*

Антитеза. *Антропогенное воздействие на биосферу проявляется прежде всего на региональном и локальном уровнях; в глобальном масштабе оно не привносит качественно новых экологических феноменов.*

Пафос глобальности объясняется тем, что обитаемой частью планеты стала вся Земля. Однако заселение Земли и антропогенное воздействие на ее ландшафты весьма неравномерно. Объективно эти процессы следует оценивать как явления регионального или локального масштаба. Субъективно же отклик природы на антропогенный пресс воспринимается как глобальная экологическая катастрофа.

В развитых странах более 70 % населения сосредоточено в городах, где возникновение экологических катастроф наиболее вероятно. Свои проблемы человек склонен рассматривать как глобальные. Драматизация экологической ситуации сродни тому, как оценивают горожане свое будущее, когда в одном доме протекает канализация, в другом происходит утечка газа, а из дворов неделями не вывозится мусор. И хотя эти явления локальны, люди говорят и будут говорить об обострении экологической ситуации в целом.

По закону обратной связи неконтролируемый рост населения, истощение природных ресурсов, прежде всего энергетических и пищевых, должны привести к сокращению его численности. Следует предвидеть, что экологические потрясения и связанная с ними гибель людей будут происходить в первую очередь на «местной почве». Устойчивое развитие может быть достигнуто только на основе разрешения региональных и локальных экологических и социальных конфликтов.

Теза. *Ход эволюции закономерно направлен в сторону цефализации – всевозрастающей роли в поведении животных высшей нервной деятельности; Человеку разумному принадлежит главенствующая роль в биосфере.*

Антитеза. *Человек разумный – слепая ветвь эволюции; в биосфере существуют группы организмов, обладающие потенциальной возможностью порождения новых видов, способных противостоять экологическому стрессу, вызванному природными или антропогенными факторами.*

Анализ видового разнообразия современной биоты показывает, что приматы составляют ее ничтожную часть. Факторы естественного отбора в обществе подавлены этическими соображениями. В силу высокой биологической организации *Человек разумный* образует слепую ветвь эволюционного древа.

В спектре видов современной биоты среди животных резко доминируют членистоногие. Поведением последних управляет не высшая нервная деятельность, а сложная система инстинктов. Именно эта группа организмов обладает высокой потенциальной способностью мутагенного взрыва и формирования видов, способных противостоять экологическому стрессу. Среди них немало возбудителей новых болезней, вредителей и паразитов, наносящих урон человечеству. Борьба с ними является необходимым условием устойчивого развития общества.

Подчеркнем положения, которыми следует руководствоваться при выборе стратегии устойчивого развития:

1. В живом веществе биосферы заложены огромные резервы самовосстановления и саморазвития. Дестабилизация среды под воздействием антропогенного пресса угрожает устойчивому развитию общества, но не биосферы.

2. Путь решения проблем человечества должен начинаться с нормализации экологической ситуации на региональном и локальном уровнях.

3. *Человек разумный* – слепая ветвь эволюции. Его устойчивое существование требует постоянных усилий в борьбе с конкурентами. В биосфере существуют группы организмов, обладающие потенциальной возможностью порождения новых видов, в том числе вредных для человека.

Перечисленные положения показывают, что человечество должно заботиться о тех аспектах природопользования, которые могут обеспечить баланс между интересами общества и состоянием природы. В конце XX – начале XXI в. стало формироваться новое научное направление «геоэкология» – наука о взаимодействии географических, биологических (экологических) и социально-производственных систем [10–12]. Особое внимание геоэкология обращает на отрицательные последствия хозяйственной деятельности человека, разработку рекомендаций по рациональному природопользованию и охране природы.

Систему географических наук можно представить в виде стопки дисков, где каждый диск – частная географическая дисциплина. Осью, связующей всю стопку, являются идеи докучаевской географии, а в современных условиях – экологическая парадигма [11]. Сегмент, вырезанный из стопки, – это региональный объект геоэкологических исследований. Он включает в себя природно-территориальный комплекс (ПТК) с присущими ему биоценозами и природно-хозяйственную систему (ПХС) с ее социально-экологическими проблемами.

Требует уточнения вопрос о соотношении таких направлений общей геоэкологии, как ландшафтная экология и социоэкология. Подобно тому, как мы, ратуя за единство географий, все же признаем самостоятельность объектов и методов физико-географических и экономико-географических исследований, в общей геоэкологии также выделяются два направления – геоэкология и социоэкология, ищущие пути гармонизации человеческой деятельности в конкретных географических условиях.

Итак, объектом геоэкологии на региональном уровне являются находящиеся во взаимодействии системы: географические, экологические (биологические) и социальные (природно-хозяйственные). В глобальном масштабе – это триединство географической оболочки, биосферы и техносферы. Данному определению геоэкологии соответствует методологический принцип равнозначности системообразующей роли элементов каждой группы множеств: гео-, эко- и социосистемы, которые взаимосвязаны и взаимно определяют друг друга. Из этого следует вывод о географическом детерминизме – социосистемы зависят от природных условий, в которых они формируются, и социальном детерминизме – природные системы меняются под воздействием человеческой деятельности.

Грезы о ноосфере

Одно из течений философии, рассматривающее единство человека с Вселенной, известно под названием космизма. В русском космизме присутствуют представления о космосе как живом организме, находящемся во взаимодействии с Творцом. Русские философы-космисты Н.Ф. Федоров, С.Н. Булгаков, К.Э. Циолковский и другие сыграли немаловажную роль в утверждении ноосферной концепции [14].

Н.Ф. Федоров в своем труде «Философия общего дела», опубликованном в 1906 г., заявляет, что главная цель общего дела человечества состоит в управлении слепыми, хаотичными силами природы: «...Нет в природе целесообразности... ее должен внести сам человек, и в этом заключается высшая целесообразность» [16, с. 71]. Средством для наведения порядка в природе должна стать хозяйственная деятельность.

Эту мысль развивает С.Н. Булгаков в работе «Философия хозяйства», опубликованной в 1912 г.: «Человек создает как бы новый мир, новые блага, новые знания, новые чувства, новую красоту – он творит культуру... Рядом с миром естественным создается мир искусственный, творения человека, и этот мир новых сил и новых ценностей увеличивается от поколения к поколению» [1, с. 13]. В 1939 г. В.И. Вернадский писал: «Мы живем в небывалую геологически яркую эпоху. Человек своим трудом – и своим сознательным отношением к жизни – перерабатывает земную оболочку – геологическую область жизни, биосферу. Лик планеты меняется глубочайшим образом. Создается стадия ноосферы. Сейчас в биосферной земной оболочке происходит бурный расцвет, дальнейшая история которого представляется нам грандиозной» [3, с. 56, 57]. Обретя разум, человечество, взятое в целом, по словам Вернадского, своим направленным трудом перестраивает биосферу, переводя ее в качественно новое состояние – ноосферу.

Необходимо отметить различие в функционировании биосферы, являющейся системой открытого типа, и рукотворной ноосферы – системы закрытого типа. Лауреат нобелевской премии И.Р. Пригожин указал на принципиальные различия открытых и закрытых систем [13]. Открытые, к которым относятся биосфера, географические и экологические системы, существуют в постоянном взаимодействии с внешней средой, черпая из нее энергию, вещество и информацию, благодаря чему мера организованности систем (негэнтропия) возрастает. Закрытые системы, к которым относятся все техногенные сооружения, по мере развития исчерпывают свои внутренние ресурсы, растет мера их неорганизованности (энтропия). Предоставленные сами себе рукотворные техногенные системы рано или поздно разрушаются. Именно поэтому противником идеи ноосферы был Л.Н. Гумилев. Это несогласие заключено в его вопросе: «Так ли уж разумна “сфера разума”? Ведь ее развитие ведет к замене живых процессов… Человеческое творчество вырывает из природы частицы вещества и ввергает их в оковы форм. Камни превращаются в пирамиды или Парфенон, шерсть – в пиджаки, металл – в сабли и танки. А эти предметы лишены саморазвития...» [4, с. 326].

В.И. Вернадский называл принцип единства всех людей законом природы. В наши дни возник метафорический образ Земли как космического корабля. Нормальная работа систем жизнеобеспечения такого корабля для благополучного

путешествия в космосе может поддерживаться только общими разумными действиями всех землян. В противоположность Вернадскому Л.Н. Гумилев [4] не признавал духовной общности человечества. Неравномерно развивающиеся этносы часто вступают в жестокое противоборство. Население нашей планеты, разделенное на государства, трудно назвать единым и разумным целым. Поэтому вполне уместно сравнение человечества с кораблем, потерпевшим крушение: в спасательных шлюпках находятся жители богатых стран, они затеряны в океане и окружены многочисленными тонущими народами бедных стран. «Этика спасательной шлюпки» столь же очевидна, сколь беспощадна: чтобы кого-то спасти, надо взять его на борт шлюпки, вместимость которой ограничена. Спасти чью-то жизнь – значит пожертвовать своей, бросившись в бушующий океан.

Противоположное ноосфере понятие «какосфера» ввел акад. Г.А. Заварзин [6], поясняя его следующим образом. «Какос» – по-гречески *скверный, плохой.* «Какофония», широко известный термин, отражающий нарушение гармонии в музыке, хорошо соответствует тому, что происходит под действием антропогенного пресса в биосфере. В какосфере природа изменена деятельностью человека настолько, что здесь искажены природные связи и ограничена способность к восстановлению. В обывательском словоупотреблении какосфере соответствует выражение «плохая экология».

Какосфера существует за счет биосферы. Из биосферы в какосферу поступают воздух, вода, пища, материалы; из какосферы в биосферу выносятся испорченный воздух, сточные воды, бытовые отходы, отходы промышленного производства. Какосфера не представляет собой автономной экосистемы, способной к длительному самовоспроизводству. Лишившись «экологических услуг» биосферы, человечество вынуждено будет жить как бы в громадном бункере с автономной системой жизнеобеспечения – техническом воплощении ноосферы в миниатюре.

Проблемы коэволюции и воспитания экологической этики

Существование человечества в современной биосфере невозможно без приспособления к быстро меняющимся условиям внешней среды. Принцип коэволюции, которому должно следовать поведение общества для поддержания устойчивого развития, предложил Н.Н. Моисеев [8, 15]. Однако биологическая коэволюция человека и биосферы, подобная взаимному приспособлению цветковых растений и насекомых-опылителей, невозможна. Социальный прогресс избавил человечество от естественного отбора, который мог привести к появлению *Человека будущего,* адаптированного к условиям какосферы. Человечество идет не по пути биологической коэволюции, а по пути создания цивилизации, живущей по собственным законам, не согласованным с биосферой. Принцип устойчивого развития должен состоять не в стремлении к «хорошей» ноосфере, а в строгом следовании законам биосферы; за красивым фасадом ноосферы, в конечном счете, скрывается какосфера.

Коэволюция возможна только в духовной сфере – в отказе от антропоцентризма и признании приматом законов биосферы. *Человек разумный* нуждается в экологии биологической, то есть в экологии, необходимой для элементарной жизни, однако как существо разумное человек нуждается в благоприятных условиях

нравственного общения. По словам Д.С. Лихачева, это экология культуры, без которой невозможна духовная жизнь – жизнь, воспитывающая нравственность, уважение к окружающему, к прошлому, заботу о будущем [7].

Огромное влияние на развитие науки и литературы в конце XVIII – начале XIX в. оказала натурфилософская доктрина, уходящая своими корнями в пантеистические верования древнейших культур. Ее сторонники не отрицают методов научного познания, но вместе с тем признают созидательную и направляющую силу Высшего духовного начала – Абсолюта. Именно натурфилософу Ф. Шеллингу было дано предвидеть проблемы сегодняшнего дня. Он писал, что идея непрекращающегося прогресса есть идея бесцельного прогресса, а то, что не имеет цели, не имеет смысла, следовательно, бесконечный прогресс — это самая мрачная и пустая мысль. Последняя цель познания – достичь состояния покоя. В поэтической форме эта мысль выражена Ф. Шиллером:

Доколе мир мы не скрепим
Метафизическим ученьем,
Держаться будет он одним
Любви и голода мученьем.

Шиллер противопоставляет возвышенному состоянию души человека его животные инстинкты – страдания от неудовлетворенных сексуальных и гастрономических желаний.

Семена натурфилософских идей немецкой классической философии нашли в России благодатную почву. Русская классическая литература, особенно поэзия, воплотили совершенно особое восприятие мира, не укладывающееся в тесные рамки ортодоксального материалистического мышления. Интуитивно, силой художественного предчувствия им удается проникнуть в глубь процессов, совершающихся во Вселенной. Тревога о бытии землян звучит в строках А. Ахматовой:

Пространство выгнулось и пошатнулось время,
Дух скорости ногой ступил на темя
Великих гор и повернул поток.
Отравленным в земле прозябло семя,
И знали все, что наступает срок.

Заключение

Выживание человека в условиях глобального экологического кризиса, несомненно, зависит от научных знаний и внедрения в практику новых технических достижений. Но достижения науки и техники не смогут принести ожидаемых результатов без опоры на нравственное воспитание, на определенные культурные традиции.

Многое в поведении людей зависит от генетического кода биологического вида *Homo sapiens*, имеет инстинктивный характер и направлено на сохранение рода человеческого. Культура является негенетической памятью людей. Господствующее мировоззрение, этические нормы как выражение культуры также играют важную роль в сохранении социума. Культурные и биологические нормы поведения человека должны носить экологическую направленность – сохранять среду обитания благоприятной для жизни.

Литература

1. *Булгаков С.Н.* Философия хозяйства. Ч. 1. Мир как хозяйство. – М., 1912. (Переизд.: Булгаков С.Н. Соч.: в 2 т. – М., 1993. – Т. 1. – С. 49–297.)
2. *Вернадский В.И.* Биосфера I–II // Избр. соч. Т. V. – М., 1960. – С. 7–102.
3. *Вернадский В.И.* Научная мысль как планетное явление. – М., 1991. – 270 с.
4. *Гумилев Л.Н.* Этногенез и биосфера Земли. – Л., 1990. – 528 с.
5. *Заварзин Г.А.* Три жизни великого микробиолога: Документальная повесть о Сергее Николаевиче Виноградском. – М., 2009. – 240 с.
6. *Заварзин Г.А.* Какосфера. Философия и публицистика. – М., 2011. – 460 с.
7. *Лихачев Д.С.* Раздумья. – М., 1991. – 316 с.
8. *Моисеев Н.Н.* Экологическое мировоззрение // Филос. экологич. образования. – М., 2001. – С. 21–29.
9. *Навстречу* «зелёной» экономике: пути к устойчивому развитию и искоренению бедности. – Найроби (Кения); М., 2011. – 738 с.
10. *Основы* геоэкологии: учебник / под ред. В.Г. Морачевского. – СПб., 1994. – 352 с.
11. *Петров К.М.* Геоэкология: основы природопользования. – СПб., 1994. – 216 с.
12. *Смирнов Н.П.* Геоэкология. – СПб.: РГГМУ, 2011. – 350 с.
13. *Пригожин И.Р., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. – М., 1986. – 432 с.
14. *Стратегия* выживания: космизм и экология. – М., 1997. – 304 с.
15. *Федоров М.П., Чусов А.Н., Шилин М.Б.* Экология для технических университетов: от «экономики природы» к «экологической экономике» за 150 лет (1866–2016). – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2017. – 145 с.
16. *Фёдоров Н.Ф.* Философия общего дела // Русский космизм. – М., 1993. – С. 71–81.
17. *Lovelock G.E.* Gaia: A New Look at Life on Earth. – Oxford; New York; Toronto; Melburn, 1982. – 326 p.

УДК 504.12:[551.461.2+574.52+591.95+627]:551.46(262.83)

Н.В. Аладин*, Т. Чида**, Ж.-Ф. Крето, З.К. Ермаханов****, Б. Жоллибеков*****, Ф. Миклин******, И.С. Плотников*, А.Н. Егоров**********

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОЕ БУДУЩЕЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

* ФГБУН «Зоологический институт Российской академии наук» (ЗИН РАН), nikolai.aladin@zin.ru; ** Slavic-Eurasian Research Center, Hokkaido University; *** LEGOS/CNES, Тулуза; **** Аральский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства»; ***** Институт биоэкологии, Нукус; ****** Западно-Мичиганский университет; ******* ФГБУН «Институт озероведения Российской академии наук» (ИНОЗ РАН)

N.V. Aladin, T. Chida, J.-F. Cretaux, Z.K. Ermakhanov, B. Jollibekov, P. Micklin, I.S. Plotnikov, A.N. Egorov

MODERN PROBLEMS AND POSSIBLE FUTURE OF THE ARAL SEA

В статье показана современная антропогенная регрессия Аральского моря и ее последствия. Рассматриваются возможное будущее этого соленого бессточного озера, превратившегося в группу остаточных водоемов, и возможные сценарии их реабилитации и частичного восстановления.

Ключевые слова: *Аральское море, соленые озера, водный баланс, соленость, биоразнообразие.*

The paper shows the modern anthropogenic regression of the Aral Sea and its consequences. The possible future of this saline closed lake, turned into a group of residual reservoirs, and possible scenarios for their rehabilitation and partial restoration are considered.

Keywords: *Aral Sea, saline lakes, water balance, salinity, biodiversity.*

Введение

Аральское море представляет собой бессточное соленое озеро, расположенное в пустынной зоне Средней Азии – в Туранской низменности у восточной кромки плато Устюрт, на территории Казахстана и Узбекистана. Его водосборный бассейн занимает более 2 млн км^2. В это озеро впадают только две реки – Сырдарья на северо-востоке и Амударья на юге [4].

В Арале выделяют две главные его части: северную – Малое море, или Малый Арал, и южную – Большое море, или Большой Арал, которые разделял остров Кокарал. Их связывали два пролива: узкий мелководный пролив Аузы-Кокарал и широкий глубокий пролив Берга. В свою очередь, эти части Арала включают в себя по несколько меньших котловин. При такой морфологии [4] Аральское море при снижении уровня может разделяться на отдельные остаточные водоемы.

Несколько веков, вплоть до 1960-х гг., состояние Аральского моря было условно стабильным. В конце 1950-х гг. его уровень находился на отметке +53,4 м, площадь достигала 67 499 км^2 при объеме воды 1089 км^3 и средней глубине 16 м. Площадь Малого моря составляла 6118 км^2, объем – 82 км^3 при средней глубине 13,5 м (максимальная достигала 29,5 м). Площадь Большого Арала составляла 61 381 км^2, объем – 1007 км^3, средняя глубина – 16,5 м. Тянущаяся с юга на север подводная гряда разделяет его на глубоководную западную часть, максимальная глубина которой достигала 69 м, и обширный восточный бассейн с максимальной глубиной 28 м. Арал был солоноватоводным со средней соленостью 10 ‰ [4].

Объем воды в Аральском море и, соответственно, площадь и уровень поверхности определяются водным балансом. Он складывается из стока рек Амударьи и Сырдарьи, основного источника воды, небольшого количества атмосферных осадков, притока подземных вод – приходная составляющая, очень значительного испарения с поверхности, а также небольшой фильтрации вод в берега и дно – расходная составляющая [4, 11–13].

Уровень Аральского моря никогда не оставался стабильным, так как на водный баланс влияли изменения климата, от которых напрямую зависел объем стока рек Амударьи и Сырдарьи. Свое влияние оказывали и земледельческие цивилизации. В бассейнах этих рек развито орошаемое земледелие, оказывающее сильное влияние на их сток на протяжении многих веков [3].

В 1960-х гг. в Аральском море обитало около 200 видов свободноживущих беспозвоночных, среди которых преобладали пресноводные виды. Рыбы были представлены 32 видами, большей частью пресноводными [6, 15, 16].

Высыхание Аральского моря

В 1960 г. началось постепенное высыхание Аральского моря (рис. 1), ставшее следствием прогрессирующего сокращения стока рек Амударьи и Сырдарьи из-за возраставшего безвозвратного изъятия речной воды, в особенности на орошение. Прежде это незначительно уменьшало объем достигавшей озера речной воды благодаря существенному возвратному стоку с орошаемых полей в реки и другим компенсирующим факторам – сокращение потерь на транспирацию водолюбивыми растениями в низовьях рек и дельтах, снижение испарения из-за уменьшения весенних паводков [4]. Но при дальнейшем расширении орошения (с начала XX в. площадь орошаемых земель увеличилась более чем вдвое) [рис. 2] такая компенсация стала уже недостаточной. Приток речной воды в Арал резко сократился, прежнее равновесие нарушилось, и возник дефицит водного баланса. В результате начались быстрое падение уровня, сокращение площади поверхности и рост солености [11, 12].

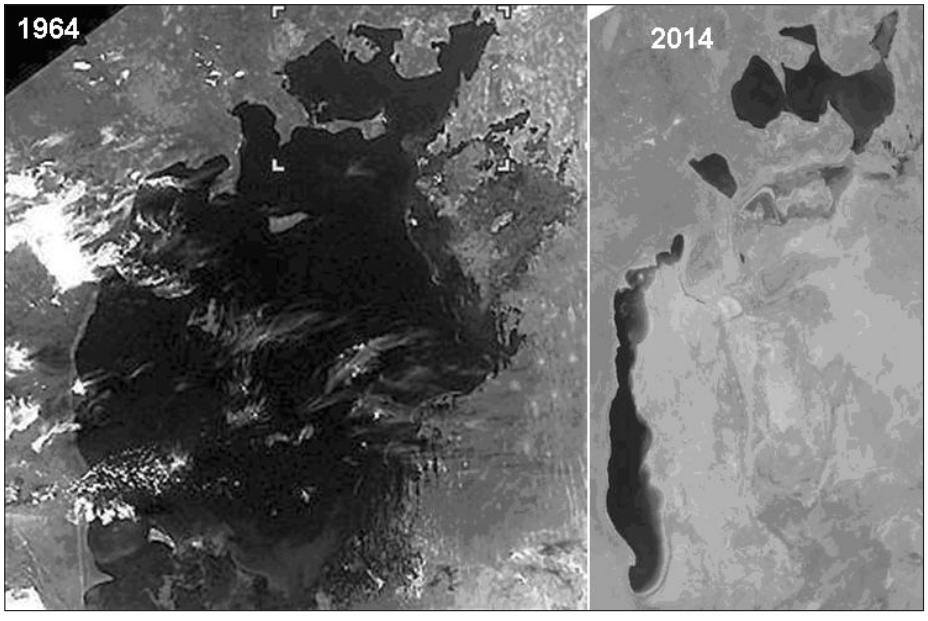

Рис. 1. С 1960 г. Аральское море неуклонно высыхало и мелело

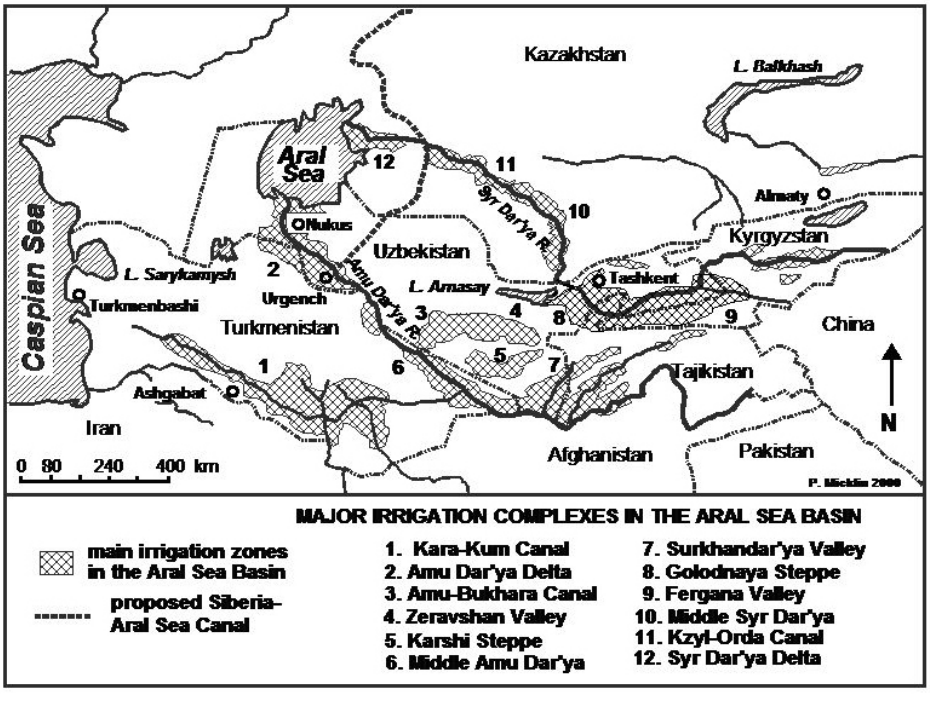

Рис. 2. Развитие орошения в бассейне Аральского моря

Высыхание Аральского моря привело к серьезным негативным последствиям для всей его биоты. Результатом роста солености стало катастрофическое уменьшение биоразнообразия. Исчезли неспособные пережить осолонение пресноводные и солоноватоводные виды. В фауне свободноживущих беспозвоночных к концу 1980-х гг. осталось только небольшое число широко эвригалинных видов [6, 16]. Когда к началу 1980-х гг. из-за роста солености исчезли составлявшие основу промысла пресноводные рыбы, рыболовство на Аральском море прекратилось [10].

Разделение Арала

В конце 1980-х гг., когда уровень Арала, понизившись на 13 м, достиг отметки +40 м, пересох связывавший Малое и Большое море пролив Берга (пролив Аузы-Кокарал пересох еще к началу 1970-х гг.). В результате Аральское море разделилось в 1987 г. на два водоема со своими гидрологическими режимами – Малый (Северный) и Большой (Южный) Арал. В первый впадает Сырдарья, а во второй – Амударья. К этому времени площадь всего Аральского моря уже сократилась до 40 000 км^2 (на 60 %), объем – до 333 км^3 (на 33 %), средняя соленость выросла с 10 до 30 ‰ [7].

После разделения Аральского моря собственный водный баланс Малого Арала является положительным благодаря тому, что сток Сырдарьи (к этому времени он увеличился), подземный сток и атмосферные осадки на поверхность превышали испарение. Избыток воды стал перетекать в Большой Арал. Это происходит главным образом весной и в начале лета при максимуме стока Сырдарьи. На обсохшем дне пролива стекающая вода промыла канал на месте занесенного песком судоходного фарватера [2].

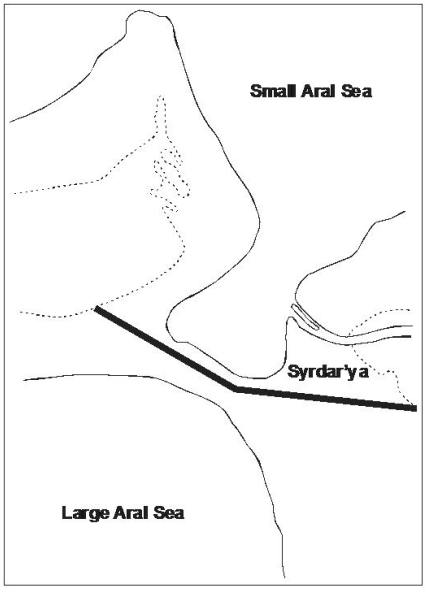

Рис. 3. Плотина в проливе Берга

Первая плотина в проливе Берга

Чтобы удержать в Малом море стекающую из него воду и за счет этого поднять его уровень и снизить соленость, местные власти приняли решение построить в проливе Берга 13-километровую земляную плотину (рис. 3). Строительство завершилось в августе 1992 г. Уровень Малого Арала повысился более чем на 1 м, рост прекратился, началось постепенное снижение солености. С другой стороны, перекрытие стока из Малого моря несколько ускорило высыхание Большого Арала. По нашим приближенным оценкам, этот сток мог составлять порядка 3 км^3/год, то есть около одной четвертой части всех поступлений воды в Большое море [1, 2]. Постройка этой плотины создала условия для сохранения Малого Арала и последующего восстановления его утраченного биоразнообразия.

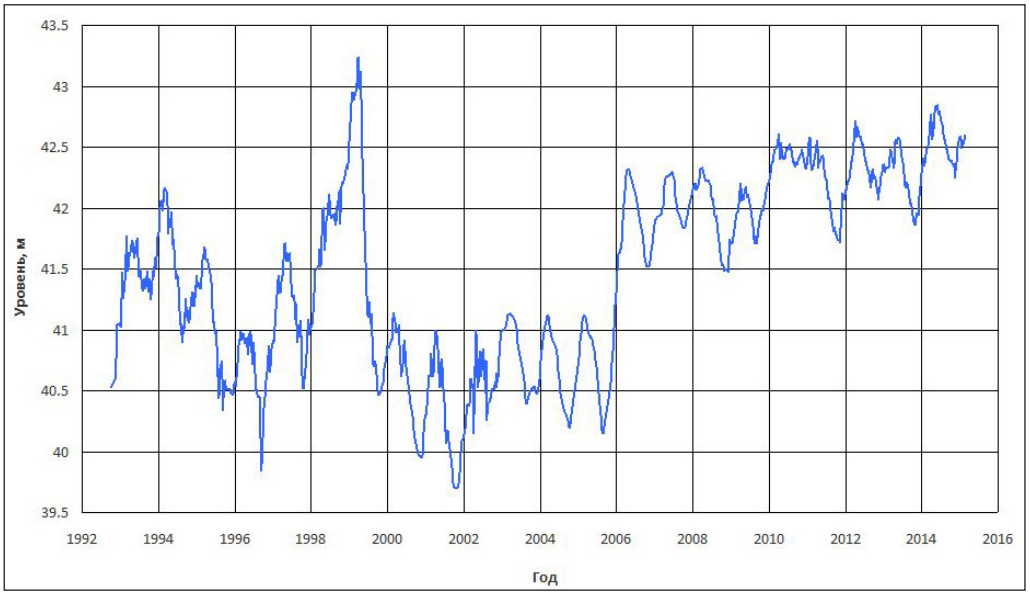

Рис. 4. Уровень Малого Аральского моря по данным спутниковой альтиметрии (Topex/Poseidon, Jason1, Jason2, Jason3)

Данная земляная плотина не только сама по себе была ненадежной, но и не имела водопропускного устройства для сброса воды и предотвращения подъема уровня Малого Арала выше безопасной отметки (рис. 4). Из-за этого весной, когда сток Сырдарьи максимален, происходил прорыв плотины, но ее быстро восстанавливали. И все же в апреле 1999 г., когда уровень превысил отметку +43 м (то есть достиг гребня плотины), во время шторма плотина была сильно повреждена, и после этого ее уже не стали восстанавливать [1, 3].

Новая плотина в проливе Берга

По решению правительства Казахстана на месте первой плотины в проливе Берга российской компанией «Зарубежводстрой» в 2004–2005 гг. была построена новая капитальная Кок-Аральская плотина (рис. 5), позволяющая поднять уровень зарегулированного Малого Арала до +42…+43 м. Она имеет водослив для пропуска излишков воды и поддержания уровня Малого моря на безопасной отметке. Когда идет сток через плотину, остаточные водоемы Большого Арала становятся на некоторое время связанными между собой (рис. 6) [1, 3, 7, 14].

Площадь Малого Арала после подъема его уровня до расчетного достигла 3487 км^2, а объем – 27 км^3. К настоящему времени средняя соленость в Малом (Северном) Аральском море значительно снизилась и составляет менее 10 ‰ [11]. В дальнейшем она может стать еще ниже.

Значительное снижение солености и образование сильно опресненной зоны около дельты Сырдарьи сделало возможным обратное вселение в Малое море естественным путем многих видов пресноводных и солоноватоводных беспозвоночных,

а также пресноводных промысловых рыб, выпавших из фауны Арала из-за осолонения. Это виды, обитающие в рефугиумах – Сырдарье и расположенных в ее низовьях и связанных с ней озерах, или же виды беспозвоночных, имеющие долго сохраняющие жизнеспособность покоящиеся яйца. К настоящему времени [6] в Малом Арале вновь появились многие виды пресноводных и солоноватоводных беспозвоночных. С другой стороны, сильное снижение солености становится неблагоприятным для прежде многочисленных представителей морской фауны и солелюбивых видов. Стало возможным возвращение в Малый Арал и процветание ценных аборигенных промысловых пресноводных видов рыб, что позволило возродить промышленное рыболовство (рис. 7). До этого, в 1990-х гг., единственным промысловым видом была вселенная в 1980-е гг. черноморская камбала-глосса [10].

Большое Аральское море

Водный баланс Большого Арала остался отрицательным. Высыхание и рост солености продолжились, и к концу 1990-х гг. он превратился в гипергалинный водоем. В 2000 г. соленость превысила 60 ‰, а к 2004 г. достигла 100 ‰. Продолжающееся падение уровня привело к разделению этой части Аральского моря на группу остаточных водоемов. В начале 2003 г., когда уровень упал на 22 м до отметки примерно +31 м, Большое море разделилось на глубокий Западный и мелководный Восточный Большой Арал (рис. 8), соединенные протяженной узкой протокой [5]. К 2006 г. от Восточного Большого Арала отделилась его наиболее глубокая часть – залив Тще-Бас.

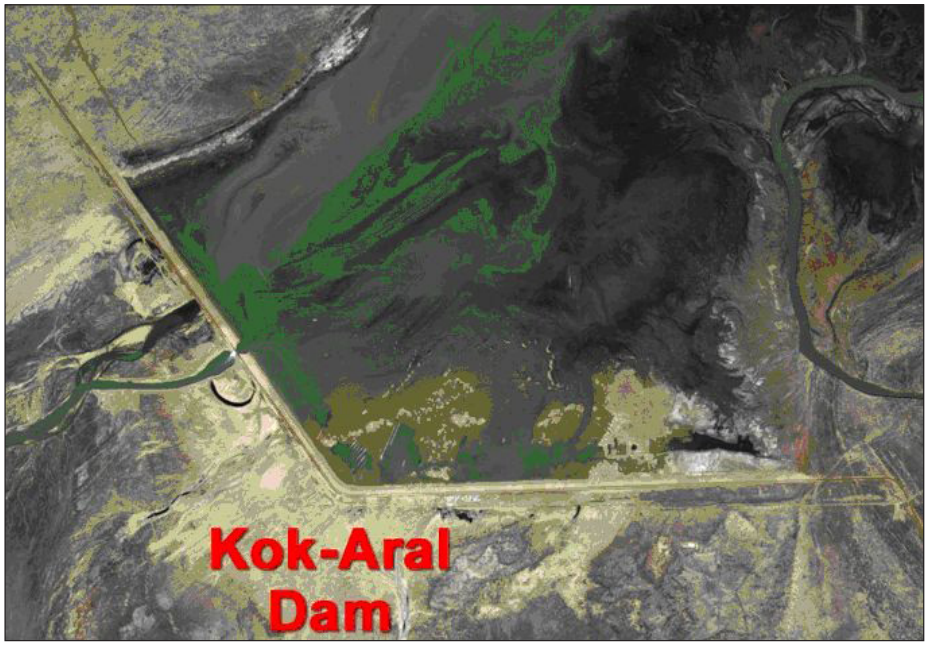

Рис. 5. Новая плотина в бывшем проливе Берга

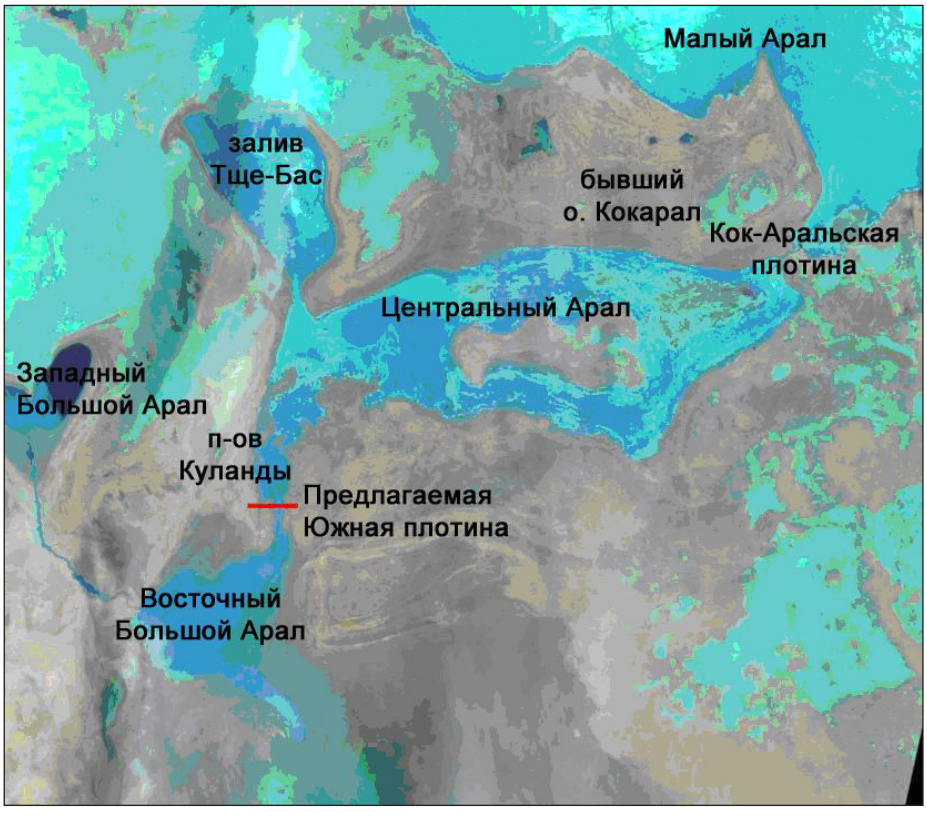

Рис. 6. Поступление воды из Малого Арала в остаточные водоемы Большого Арала

Когда большой объем воды из Малого Арала сбрасывается через Кок-Аральскую плотину, пересохшая северная оконечность восточного бассейна обводняется, и ее связь с заливом Тще-Бас на время восстанавливается (см. рис. 6) [3], а через протоку идет подпитка Западного Большого Арала.

В сентябре 2009 г. общая площадь остаточных водоемов Большого Аральского моря составляла 4922 км^2 (8 % от площади в 1960 г.), объем – 58 км^3 (6 % от объема в 1960 г.), соленость в западной части и в заливе Тще-Бас – >100 ‰, в восточной части – >200 ‰ [12]. Соленость во всех них увеличилась настолько, что исчезли все рыбы (см. рис. 7) и выжило только несколько видов свободноживущих беспозвоночных. Туда вселился ряд галобионтов, в том числе рачок *Artemia* [16].

Центральный Арал

За счет воды, стекающей из Малого Арала через Кок-Аральскую плотину на юг в направлении остаточных водоемов Большого Аральского моря, образовалось большое озеро (рис. 6, 9, 10) – Центральный Арал [14]. Это озеро мелководное, а его восточная часть представляет собой скорее водно-болотное угодье.

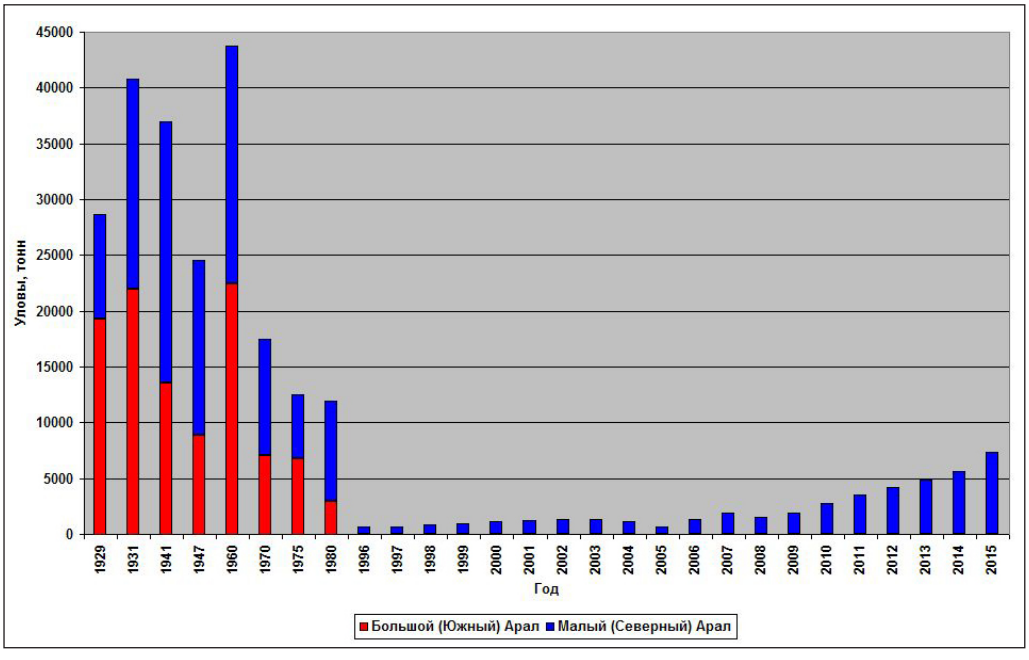

Рис. 7. Промысловые уловы рыбы в Аральском море

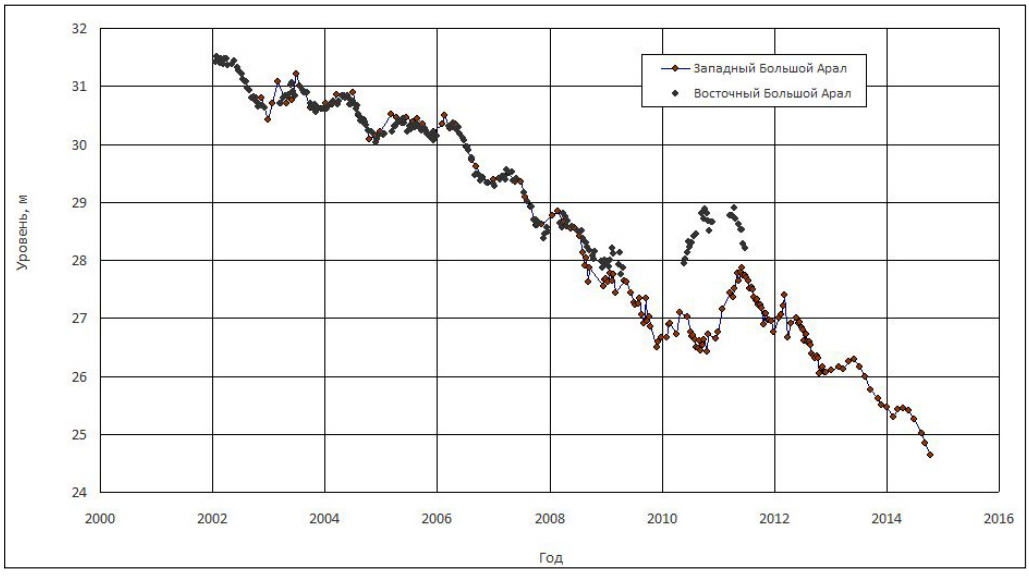

Рис. 8. Уровень Большого Аральского моря по данным спутниковой альтиметрии (Topex/Poseidon, Jason1, Jason2, Jason3)

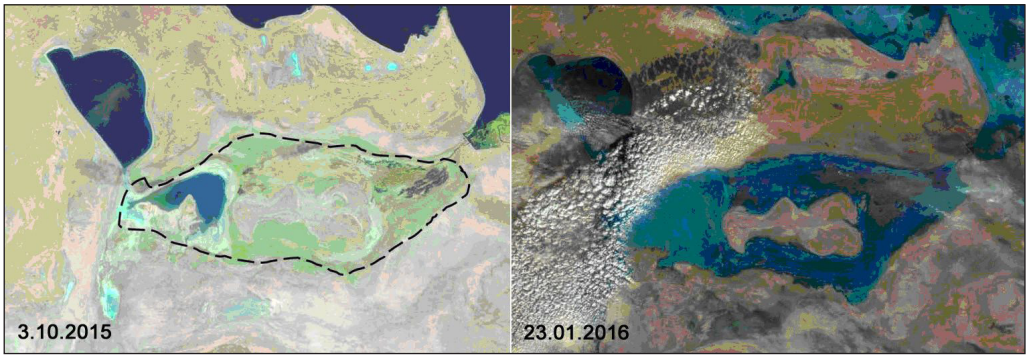

Рис. 9. Центральный Арал

Обширные тростниковые заросли испаряют большой объем воды. Вместе с водой из Малого моря в Центральный Арал выносится много ценной рыбы. Соленость на западе озера слишком высока (~70 ‰) для выживания рыб.

Центральный Арал очень нестабилен. На протяжении года его площадь изменяется очень значительно (см. рис. 9). За зиму и весну, когда сток Сырдарьи максимален [8, 9] и идет сброс воды из Малого Арала, она значительно увеличивается, соленость снижается, и вода из этого озера может пополнять Восточный Большой Арал, откуда она поступает по соединительному каналу в Западный Большой Арал, а также и в бывший залив Тще-Бас. Летом и осенью вода из Малого моря в Центральный Арал не поступает, его площадь быстро сокращается, соленость растет, и в отдельные годы он может даже полностью высохнуть.

Кроме существующей Кок-Аральской плотины (Центральная плотина), можно было построить еще одну плотину (Южная плотина) к югу от полуострова Куланды (см. рис. 6, 10), регулирующую сток из Центрального Арала. Такая плотина позволила бы сделать Центральный Арал рыбопромысловым водоемом. В настоящее время из-за отсутствия этой плотины Центральный Арал может высыхать при нехватке воды.

Возможное будущее Аральского моря

Что может ожидать Арал в будущем? Полностью высохнуть он не может. Даже если сток Амударьи и Сырдарьи сократится до нуля (что маловероятно), то для его подпитки все равно останутся грунтовые, талые и дождевые воды, а также дренажные воды с орошаемых земель. Этой воды хватит для сохранения хотя бы части Малого Арала и остатка западного бассейна Большого Арала, которые будут гиперсолеными водоемами [11, 14].

Для поддержания Малого Арала в его современном состоянии (уровень +42 м, площадь 3200 км^2) достаточно в среднем около 2,6 км^3/год стока Сырдарьи. Еще 0,6–0,7 км^3/год речной воды нужно для поддержания стока через Кок-Аральскую плотину, так как сезонная проточность необходима для регулирования солености. В период 1992–2011 гг. среднегодовой сток Сырдарьи оценивается в 5,9 км^3, что более чем достаточно для стабильности Малого Арала [14].

Рис. 10. Аральское море 19.08.2014 г.:
1 – высохший восточный бассейн Большого Аральского моря; *2* – западный бассейн Большого Аральского моря; *3* – новый Центральный Арал; *4* – Малое Аральское море; *5* – отделившийся залив Тще-Бас; *A* – Кок-Аральская плотина (Центральная плотина); *B* – предлагаемая Северная плотина; *C* – предлагаемая Южная плотина

В обозримом будущем возвращение Аральского моря к его состоянию 1960 г. крайне маловероятно. Даже если объем речного стока увеличится до прежних 56 км^3/год, то для полного восстановления этого озера потребуется очень большой срок, порядка 100 лет. Однако весьма перспективны сценарии дальнейшего частичного восстановления Арала [14].

Правительство Казахстана предполагает продолжить восстановление Малого Арала. По основному варианту нужно будет поднять до отметки +50 м уровень только части Малого моря – залива Большой Сарычеганак. Для этого необходимо перенаправить часть стока Сырдарьи в этот залив по каналу, а в горле превращенного в водохранилище залива построить плотину с водосбросом и судоходным шлюзом (рис. 10) [14].

Если ежегодно подавать в это водохранилище 1 км^3 воды, то оно может наполниться примерно за 10 лет, а если 1,5 км^3 – то за 6 лет. В связи с тем что потери воды в канале составят как минимум 15 % от ее исходного объема, для их компенсации потребуется ежегодно забирать из Сырдарьи еще около 0,2 км^3. После заполнения водохранилища в основную часть Малого Арала может сбрасываться в среднем 0,5–0,6 км^3/год по первому варианту, а по второму – примерно 1 км^3/год. Этот водоем будет почти пресноводным с соленостью менее 2 ‰ [14].

Для поддержания уровня основной части Малого Арала и ее проточности, достаточной для сохранения солености 6–8 ‰, вполне благоприятной для аборигенных пресноводных рыб, будет достаточно около 3,2 км^3/год стока Сырдарьи. А так как он (по данным за 1992–2011 гг.) по-прежнему превышает 5 км^3/год, то останется излишек воды и для подпитки Центрального Арала [14].

В почти пресноводном, превращенном в водохранилище заливе Большой Сарычеганак сформируется фауна пресноводного типа. Он начнет заселяться пресноводными гидробионтами. Это произойдет за счет их выноса в этот водоем

речной водой, самостоятельной миграции, а также заноса их покоящихся стадий водоплавающими птицами или ветром с пресных или слабо минерализованных водоемов. При этом обитающие в нем в настоящее время солоноватоводные, морские и происходящие из осолоненных континентальных водоемов виды беспозвоночных должны будут исчезнуть из-за низкой для них солености [6]. В свою очередь, низкая соленость будет благоприятной для пресноводных рыб.

Альтернативой рассмотренному варианту может стать реконструкция существующей Кок-Аральской плотины. Ее можно сделать более высокой, чтобы поднять уровень всего Малого Арала с отметки +42 м до +48 м и таким путем увеличить его объем и площадь. Но в этом случае необходим больший сток Сырдарьи – не менее 4 км^3/год. Наполнение Малого Арала до нового уровня продлится долго: при среднегодовом речном стоке 5,0 км^3 – не менее 15 лет, а при 5,5 км^3 – до 12–13 лет. Учитывая, что в 1992–2011 гг. среднегодовой сток Сырдарьи составлял 5,9 км^3, Малый Арал может наполниться и быстрее. Средняя соленость Малого Арала по мере его наполнения будет меняться и примерно через четверть века стабилизируется на 6 ‰ [14].

Если реализовать этот альтернативный проект, то солоноватоводным станет почти весь Малый Арал, а сильно опресненной будет только акватория рядом с дельтой Сырдарьи. Установившаяся соленость 5–6 ‰ благоприятна для пресноводных видов беспозвоночных и рыб, но она может негативно отразиться, вплоть до их возможного исчезновения, на морских беспозвоночных и выходцах из осолоненных континентальных водоемов аридной зоны, а также и на солоноватоводных видах [6].

Принятие решения по второму этапу восстановления Малого Арала пока что отложено на неопределенный срок [14]. Для дальнейшего улучшения ситуации необходимо повысить эффективность ирригации, чтобы увеличить сток Сырдарьи.

Тем не менее не все так хорошо [14]. Из-за глобального потепления сокращаются ледники и снежники в горах Тянь-Шаня – главного источника воды для Сырдарьи (это верно и для Амударьи, истоки которой находятся на Памире). Со временем их ускорившееся таяние увеличит речной сток. Но в итоге масса льда и снега так уменьшится, что сток начнет снижаться. Таким образом, предположения, основанные на данных по стоку Сырдарьи за 1992–2011 гг., могут оказаться излишне оптимистичными.

Прогноз возможного будущего остаточных водоемов Большого Аральского моря не внушает оптимизма. Восточный Большой Арал зависит от сброса воды из Малого Арала через Кок-Аральскую плотину и далее Центральный Арал и от стока Амударьи, который крайне нестабилен и в настоящее время не каждый год достигает моря. Состояние этого остаточного водоема может меняться от сухого солончака до обширного мелководного гипергалинного озера. К концу 2009 г. он почти полностью высох, но в начале лета и осенью неожиданно многоводного 2010 г. в него поступили большие объемы воды из Амударьи, а также из Малого Арала. Хотя водоем вновь наполнился водой, в последующие годы он снова высох (см. рис. 8). Сейчас нет достаточных оснований ожидать, чтобы такая ситуация изменилась или могла регулярно повторяться, и Восточный Большой Арал оставался обводненным.

Фауна Восточного Большого Арала, представленная до его высыхания, вероятнее всего, только артемией, сможет восстановиться и после ее гибели из цист, оставшихся на обсохшем дне или заносимых ветром с других водоемов, когда сюда вновь придет вода [6].

Западный Большой Арал зависит от притока грунтовых, дождевых и талых вод, а также сезонного стока из восточного бассейна, получающего воду из Малого Арала. Уровень этого остаточного водоема в августе 2015 г. находился между отметками +24 и +25 м, а площадь составляла ~3000 км^2. При сохранении существующей ситуации высыхание будет продолжаться, и стабилизация может наступить на отметке около +21 м при площади 2560 км^2. Но нельзя исключить, что процесс будет продолжаться до тех пор, пока эта часть Аральского моря не превратится в водоем, подобный Большому Соленому озеру в США, Мертвому морю на Ближнем Востоке и озеру Урмия в Иране (соленость >300 ‰) [13, 14]. Тогда и так уже крайне низкое биоразнообразие его фауны еще снизится, и в ней может остаться только артемия, но и она исчезнет при приближении солености к 350 ‰.

Бывший залив Тще-Бас, превратившийся в отдельный остаточный водоем, сейчас зависит от притока грунтовых, дождевых и талых вод, а также от сезонного стока из Центрального Арала, подпитываемого стоком из Малого Арала. При сохранении существующего режима состояние этого остаточного водоема может оставаться стабильным.

Будущее Западного и Восточного Большого Арала будет определять в первую очередь то, сколько воды даст ему Амударья и будет ли восстановлен ее сток в Арал.

Для Западного Большого Арала возможен и более оптимистичный сценарий. Он предполагает перенаправление стока Амударьи в водохранилище, создаваемое на месте бывшего залива Аджибай, и далее по каналу в Западный Большой Арал. Кроме этого необходимо зарегулировать сток из него в Восточный Большой Арал. По данному сценарию требуется среднегодовой сток Амударьи около 12,5 км^3, тогда как за 1990–2011 гг. он в среднем составил только около 5,4 км^3/год. Следовательно, требуется чуть больше, чем его удвоение, для чего необходимо резко повысить эффективность орошения в бассейне Амударьи. Однако наибольшие препятствия – политические и экономические, связанные с тем, что усложнятся разведка и эксплуатация перспективных нефтяных и газовых месторождений на обсохшем дне южной части западного бассейна [14].

Заключение

Современное высыхание Аральского моря еще раз показало, что человек может легко и быстро разрушить природную среду своими действиями, тогда как ее восстановление, если оно вообще возможно, – длительный и трудный процесс. Следует быть очень осторожным с масштабным вмешательством в сложные природные системы. Важно тщательно оценивать потенциальные последствия предлагаемых мер прежде чем, надеясь на лучшее, поступать так, как Советский Союз поступил с Аральским морем.

Даже если это и не привело к серьезным проблемам в прошлом, то нет гарантий, что проблемы не возникнут в будущем. Экстенсивное развитие орошения

в бассейне Аральского моря серьезно не влияло на море до 1960-х гг., потому что рост отбора воды возмещался компенсирующими факторами. Однако они были полностью использованы или подавлены.

Следует остерегаться привлекательных, но легковесных решений сложных проблем. Кризисная ситуация на Арале развивается на протяжении более чем 50 лет, и ее быстро не преодолеть. Предлагаемые «быстрые решения» вполне могут создать еще более серьезные проблемы. Устойчивые решения потребуют в долгосрочной перспективе не только крупных инвестиций и технических инноваций, но также фундаментальных политических, социальных и экономических изменений, на что требуется время.

Но не все настолько мрачно. Природная среда удивительно устойчива. Не надо терять надежду и оставлять усилия по ее сохранению, даже когда задача кажется неразрешимой. Сейчас показано, что отдельные части Аральского моря можно сохранить и даже частично восстановить. В отдаленной перспективе станет возможным в достаточной степени сократить потребление воды, чтобы обеспечить необходимый для возвращения моря к исходному состоянию объем речного стока.

Крупномасштабные проекты восстановления окружающей среды, такие как проект восстановления Малого Аральского моря, требуют тщательного мониторинга. Это необходимо не только для того, чтобы убедиться в том, что они работают, как ожидалось, и для обеспечения обратной связи, но и для того, чтобы выучить новые уроки, что поможет сделать более успешными подобные мероприятия и в других местах.

Литература

1. *Аладин Н.В.* Плотина жизни или плотина длиною в жизнь. Часть 1. «Пролог», или Первая Пятилетка (1988–1992 гг.) // Астраханский вестник экологического образования, 2012. Т. 3. № 21. – С. 206–216.
2. *Аладин Н.В., Плотников И.С.* Высыхание Аральского моря и возможные пути реабилитации и консервации его северной части // Тр. Зоол. ин-та РАН. 1995. Т. 262. – С. 3–16.
3. *Аладин Н.В., Плотников И.С.* Современная фауна остаточных водоемов, образовавшихся на месте бывшего Аральского моря // Тр. Зоол. ин-та РАН, 2008. Т. 312, № 1/2. – С. 145–154.
4. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. VII: Аральское море / под ред. В.Н. Бортника, С.П. Чистяевой. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 196 с.
5. *Квазисиноптические* экспедиционные исследования в западном и восточном бассейнах Аральского моря (октябрь 2005 г.) / П.О. Завьялов, А.Г. Арашкевич, А.Б. Грабовский и др. // Океанология. 2006. Т. 46, № 5. – С. 750–754.
6. *Плотников И.С.* Многолетние изменения фауны свободноживущих водных беспозвоночных Аральского моря. – СПб.: ЗИН РАН, 2016. – 168 с.
7. *Aladin N., Micklin P., Plotnikov I.* Biodiversity of the Aral Sea and its importance to the possible ways of rehabilitating and conserving its remnant water bodies // Environmental problems of central Asia and their economic, social and security impacts. 2008. – P. 73–98.
8. *Cretaux J.-F, Letolle R., Bergé-Nguyen M.* History of Aral sea level variability and current scientific debates // Global and Planetary Changes, 110, Special Issue SI. 2013. – P. 99–113.
9. *Cretaux J.-F., Biancamaria S., Arsen A., Bergé-Nguyen M., Becker M.* Global surveys of reservoirs and lakes from satellites and regional application to the Syrdarya river basin // Environmental Research Letters. 2015. 10 (1). – P. 015002.
10. *Ermakhanov Z. K., Plotnikov I. S., Aladin N. V., Micklin P.* Changes in the Aral Sea Ichthyofauna and Fishery During the Period of Ecological Crisis // Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2012. 17. – P. 3–9.

11. *Micklin P.* The past, present, and future Aral Sea // Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2010. 15. – P. 193–213.
12. *Micklin P.* Aral Sea Basin Water Resources and the Changing Aral Water Balance // The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. – Springer, 2014a. – P. 111–137.
13. *Micklin P.* Efforts to Revive the Aral Sea // The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake. – Springer, 2014b. – P. 361–379.
14. *Micklin P.* The Future Aral Sea: hope and despair // Environmental Earth Science, 2016. 75 (9). – P. 1–15.
15. *Plotnikov I.S., Aladin N.V., Ermakhanov Z.K., Zhakova L.V.* Biological Dynamics of the Aral Sea Before Its Modern Decline (1900–1960) // The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake. – Springer, 2014a. – P. 41–76.
16. *Plotnikov I.S., Aladin N.V., Ermakhanov Z.K., Zhakova L.V.* (2014b).The New Aquatic Biology of the Aral Sea // The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake. – Springer, 2014b. – P. 137–170.

УДК [556.31:628.3](282.247.41)«450.15»

А.П. Демин

СТОЧНЫЕ ВОДЫ И КАЧЕСТВО ВОДЫ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ВОЛГА (2000–2015 ГГ.)

ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», deminap@mail.ru

A.P. Demin

WASTE WATER AND WATER QUALITY IN THE VOLGA RIVER BASIN (2000–2015)

В статье приведены основные характеристики социально-экономического развития бассейна р. Волги в 2015 г. Показано сокращение водопотребления и водоотведения в бассейне в результате трансформации экономики и социальной сферы за 2000–2015 гг., изменение качества сточных вод. Представлены данные по существенному сокращению сброса загрязняющих веществ в составе сточных вод. Показан рост мощности станций по очистке сточных вод и низкая эффективность их работы. Выявлено, что в большинстве речных бассейнов состояние качества воды остается неудовлетворительным.

Ключевые слова: *водопотребление, водоотведение, структура сточных вод, очистные сооружения, загрязняющие вещества, качество воды.*

The main characteristics of the socio-economic development of the basin of the river Volga in 2015 are given. The reduction of water consumption and wastewater in the basin as a result of the transformation of the economy and social sphere for 2000–2015, the change in the quality of sewage are shown. Data on the significant reduction in the discharge of pollutants in sewage water are presented. The increase in the capacity of wastewater treatment plants and the low efficiency of their operation are shown. It has been revealed that in most river basins the state of water quality remains unsatisfactory.

Keywords: *water consumption, water disposal, sewage structure, treatment facilities, pollutants, water quality.*

Введение

Волга – крупнейшая река Европы. Водосборная площадь ее бассейна составляет по разным оценкам от 1360 до 1431 тыс. км^2 [8], что равняется почти трети европейской части нашей страны. Из-за выгодного экономико-географического положения, полноводности и большой протяженности Волга всегда была главной рекой России. В ее бассейн входят полностью или частично территории 38 субъектов Российской Федерации, в том числе 8 республик, 29 областей и г. Москвы.

Хотя волжский бассейн занимает только 8 % территории РФ, это важнейший в экономическом отношении регион России. Расчеты, выполненные на основе обработки статистических материалов Росстата [10], показывают, что здесь располагается 31 % посевов сельскохозяйственных культур, 43 % основных фондов экономики, производится почти половина валового регионального продукта России, что определяет высокую степень антропогенной нагрузки (табл. 1). В 2016 г. на территории бассейна проживало 60,8 млн человек (41,5 % населения РФ), из них

48,8 млн человек – в городах. На долю Волги и ее притоков приходится более 70 % грузооборота речного транспорта России. Водохранилища каскада обеспечивают с высокой степенью надежности водоснабжение городов и промышленных узлов, а также широко используются для массового отдыха, оздоровления и спорта.

Один из основных постулатов модели устойчивого развития – гармоничное сочетание социально-экономических и экологических приоритетов развития общества. Эффективной может быть признана экономика, обеспечивающая удовлетворение жизненных потребностей при одновременном уменьшении расходов сырья и энергии, сокращении производства отходов. Для экологической реабилитации волжского бассейна необходимо осуществление комплекса мер по охране и воспроизводству водных ресурсов на водосборных площадях, рационализация систем водопользования на основе осуществления политики водосбережения, сокращение объема забора свежей воды. Снижение водопотребления является

Таблица 1

Основные показатели социально-экономического развития в бассейне Волги

Регион	Число субъектов РФ*	Площадь территории в пределах бассейна, тыс. км^2	Численность постоянного населения в среднем за 2016 г., тыс. чел.			Основные фонды отраслей экономики на конец 2015 г., млрд руб.	Валовой региональный продукт в 2014 г., млрд руб.	Площадь посевов сельскохозяйственных культур в 2014 г., тыс. га	Площадь орошаемых земель на 01.01.2016 г., тыс. га
			всего	городское	сельское				
Верхняя Волга	27/10	648,0	38 035,7	31 695,8	6 339,9	49 669,1	20 258,7	9 897,2	433,4
Кама	14/1	504,3	11 774,5	8 386,6	3 387,9	9 720,1	3 920,5	6 717,7	154,4
Нижняя Волга	9/2	278,3	11 007,3	8 691,6	2 315,8	8 953,5	3 514,8	7 938,9	867,8
Всего по бассейну Волги	38/17	1 430,7	60 817,5	48 774,0	12 043,6	6 8342,7	27 693,9	24 553,8	1 455,5
Всего по РФ	85	17 125,2	146 674,5	108 844,9	37 829,6	160 725,0	58 900,1	78 525	4 663,6
Бассейн Волги, % РФ	44,7	8,4	41,5	44,8	31,8	42,5	47,0	31,3	31,1
Части бассейна, % всего бассейна									
Верхняя Волга		45,3	62,5	65,0	52,6	72,7	73,2	40,3	29,8
Кама		35,2	19,4	17,2	28,1	14,2	14,2	27,4	10,6
Нижняя Волга		19,5	18,1	17,8	19,2	13,1	12,7	32,3	59,6

* Числитель – общее количество субъектов, знаменатель – количество субъектов, полностью входящих в часть бассейна Волги.

необходимым условием сокращения объемов отводимых сточных вод и, следовательно, загрязняющих веществ (ЗВ), содержащихся в них.

Водопотребление и водоотведение в бассейне Волги

Бассейн Волги имеет огромную протяженность, включает в себя несколько природно-климатических зон, от таежной до полупустынной, и много регионов, характеризующихся своей специализацией производства, исходя из общероссийского разделения труда, и спецификой использования водных ресурсов. В целях более детального анализа эффективности водопользования разделим его, как это принято, на три части – Верхнюю Волгу, Каму и Нижнюю Волгу.

Водохозяйственная система Верхней Волги обеспечивает водоснабжение населения и хозяйства 27 субъектов Федерации, оптимальные условия для эксплуатации водного транспорта, а также орошаемое земледелие, рыборазведение, гидроэнергетику и специальные экологические попуски. Площадь бассейна составляет 648 тыс. км^2, а численность населения превышает 38 млн человек. Этот регион характеризуется высокой концентрацией промышленного производства, торговли и отраслей, оказывающих нерыночные услуги. Здесь производится 73 % валовой региональной продукции бассейна Волги. В пределах этой территории формируется более половины водных ресурсов всего бассейна и поэтому их состояние здесь, безусловно, отражается на состоянии водных ресурсов Нижней Волги и Северного Каспия.

Сток левого притока Волги р. Камы регулируется Камским, Воткинским и Нижнекамским водохранилищами. Водохозяйственная система Камы обеспечивает водоснабжение населения и хозяйства Пермского края, Кировской области, республик Удмуртия, Башкортостан, Чувашия, Татарстан и частично Вологодской, Костромской, Нижегородской, Оренбургской, Свердловской, Челябинской областей, республик Марий Эл и Коми, а также водный транспорт, рыборазведение, орошаемое земледелие, гидроэнергетику и специальные экологические попуски. Площадь бассейна составляет 504 тыс. км^2, а численность населения почти – 12 млн человек. Этот регион наряду с высокой концентрацией промышленности (прежде всего топливной, машиностроительной, химической и нефтехимической) характеризуется развитым сельским хозяйством.

Бассейн Нижней Волги охватывает территорию девяти субъектов РФ (республики Калмыкии, Татарстан, Астраханской, Волгоградской, Оренбургской, Самарской, Саратовской, Ульяновской и очень малую часть Пензенской областей) и занимает площадь 278 тыс. км^2 с численностью населения более 11 млн человек. Сток Нижней Волги регулируется Саратовским и Волгоградским водохранилищами. Здесь расположено более 800 тыс. га орошаемых угодий, на которых выращиваются теплолюбивые сельскохозяйственные культуры, широко развито искусственное воспроизводство ценных пород рыб наряду с наличием естественных нерестилищ. Промышленность представлена в основном машиностроительной и топливной отраслями.

В 2000 г. забор пресной воды из водных объектов бассейна Волги составлял 25,9 км^3, но к 2015 г. этот показатель снизился до 19,0 км^3, или в 1,4 раза [2]. Удельный вес бассейна Волги во всем водопотреблении России снизился с 30,1 %

в 2000 г. до 27,6 % в 2015 г., что говорит об ускоренном снижении антропогенной нагрузки в этом бассейне по сравнению с другими регионами России.

Анализ водопотребления и водоотведения в регионах бассейна Волги целесообразно проводить в разрезе крупных блоков отраслей – промышленности, сельского и жилищно-коммунального хозяйства, каждый из которых имеет свою специфику водопользования. Снижение объемов забора свежей воды и сбросов сточных вод произошло во всех отраслях, но с разной степенью интенсивности. Среди отраслей экономики бассейна наиболее водозатратна промышленность. В 2015 г. на ее долю приходилось 58 % общего водопотребления, хотя еще в середине 1990-х гг. (период резкого спада промышленного производства) этот показатель не превышал 49 % [6].

В 1980-е гг. потребление воды промышленностью находилось на уровне 17–18 км^3, несмотря на бурный рост производства во всех ее отраслях. Такая стабилизация связана с активным введением мощностей оборотного и повторно-последовательного водоснабжения – за 10 лет объем используемой оборотной воды увеличился на 50 %. Наибольшие темпы роста мощностей оборотного водоснабжения отмечались на Верхней Волге (61 %), наименьшие – на Каме (35 %).

С 2000 по 2015 г. использование свежей воды в бассейне Волги на производственные нужды сократилось с 11,7 до 9,2 км^3, оборотной и повторно-последовательной – с 50,9 до 44,1 км^3, а суммарное водоснабжение – с 62,7 до 53,3 км^3 [10]. Коэффициент водооборота (отношение объема оборотного и повторно-последовательного водопотребления к валовому водопотреблению на производственные нужды) в целом по бассейну Волги за этот период вырос с 81,3 до 82,8 %.

В середине 1990-х гг. ставилась задача довести долю оборотного водоснабжения в промышленности в ближайшие 10–15 лет до 85–90 % [3]. Прошло более 20 лет, но эти планы не выполнены. В настоящее время наиболее высокий коэффициент водооборота отмечается на Нижней Волге (92,7 %), что объясняется значительным развитием здесь топливной, металлургической и химической отраслей, в которых в соответствии с технологией производства наиболее широко применяется оборотное водоснабжение. В бассейне Камы этот показатель составляет 81,4 %, в бассейне Верхней Волги – 78,3 %.

В результате особенностей климатических и почвенных условий орошаемое земледелие наиболее развито в засушливых регионах нижнего течения Волги. В современных условиях на долю Верхней Волги приходится ~30 % орошаемых земель бассейна Волги, Камы – ~10 %, Нижней Волги – ~60 %. Что касается объемов воды, использованных для нужд орошения, то здесь картина еще более контрастна. На уровне 2015 г. >97 % объема водопотребления было использовано на Нижней Волге, 2 % – на Верхней Волге и <1 % – в бассейне Камы.

Орошаемое земледелие было одним из ведущих и наиболее динамично развивающихся водопотребителей в бассейне. С 1970 по 1990 г. площадь орошаемых земель возросла с 0,32 до 2,13 млн га, но после сокращения в кризисные 1990-е гг. стабилизировалась на уровне 1,5 млн га. Резко выросла площадь орошаемых земель, не используемых в сельскохозяйственном производстве в связи с высоким уровнем грунтовых вод и засолением почв. Из-за неисправности оросительных систем, отсутствия поливной техники, дороговизны услуг водохозяйственных

организаций площадь фактически политых земель в бассейне Волги снизилась с 717 тыс. га в 2000 г. до 436 тыс. га в 2015 г. В бассейне Камы за 15 лет площадь фактически политых земель снизилась в 3,3 раза, на Верхней Волге – в 2 раза, на Нижней Волге – в 1,4 раза. Существенно снизились объемы воды, используемой на орошение. Так, если в 2000 г. на нужды регулярного и лиманного орошения расходовалось 1,68 км^3, то в 2015 г. – 0,8 км^3 воды. Произошло это как из-за резкого сокращения поливаемых площадей, так и за счет снижения удельного водопотребления.

Площадь орошаемых земель России, которые не поливаются, возросла с 0,8–1 млн га в начале 1990-х гг. до 3 млн га. Если в 2000 г. удельный вес не политых по различным причинам орошаемых земель (из-за их реконструкции, ввода в эксплуатацию после начала вегетационного сезона, низкой водообеспеченности и т. д.) в среднем по бассейну Волги составлял 53 %, то к 2015 г. он повысился до 70 %. Ежегодно из-за неисправности оросительной сети и поливной техники, резкого удорожания стоимости электроэнергии и услуг водохозяйственных организаций не поливается в большинстве регионов Камы 50–80 % орошаемых земель. Еще хуже наблюдается ситуация в бассейне Верхней Волги. Здесь в большинстве регионов не поливается 70–90 % земель, числящихся в составе орошаемых, а в некоторых регионах поливается лишь каждый двадцатый гектар с оросительной сетью. Несмотря на все трудности, в большинстве регионов Нижней Волги ежегодно поливается 40–60 % орошаемых земель, хотя еще в конце 1990-х гг. этот показатель, например, в Астраханской области доходил до 98 %.

Жилищно-коммунальное хозяйство удовлетворяет потребность в воде населения, коммунальных, транспортных и прочих непромышленных предприятий. Ситуация с питьевым водоснабжением в бассейне Волги достаточно тревожная. Значительное число жителей использует недоброкачественную питьевую воду. До сих пор почти 10 % горожан и около 45 % сельчан пользуются водой из колодцев, родников, водоразборных колонок, а не из водопровода.

Максимальное значение объема использования воды на хозяйственно-питьевые нужды в бассейне Волги было отмечено в 1991 г. – 6,94 км^3. В последующие годы оно постоянно снижалось: в 2000 г. – 6,44 км^3; в 2005 г. – 6,03 км^3; в 2010 г. – 4,6 км^3; в 2015 г. – 3,78 км^3. В среднем по бассейну с 2000 по 2015 г. среднесуточное водопотребление 1 жителя (городского и сельского) снизилось с 289 до 171 л, или на 41 %. Впечатляющие успехи по снижению водопотребления достигнуты в Москве – в 2,6 раза. Наряду с прочими, одной из основных причин этого является реализация программы по оснащению жилищного фонда приборами учета воды.

В результате сокращения водопотребления в жилищно-коммунальном, сельском хозяйстве и промышленности сброс сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод в поверхностные водные объекты в целом по бассейну Волги сократился за 15 лет с 17,4 до 12,6 км^3 (в 1,4 раза). На бассейн Верхней Волги в 2015 г. приходилось 65 % водоотведения. Значительную часть отводимых после использования вод составляют загрязненные сточные воды. Их доля в общем объеме отводимых сточных вод сократилась с 48 % в 2000 г. до 43,5 % в 2015 г.

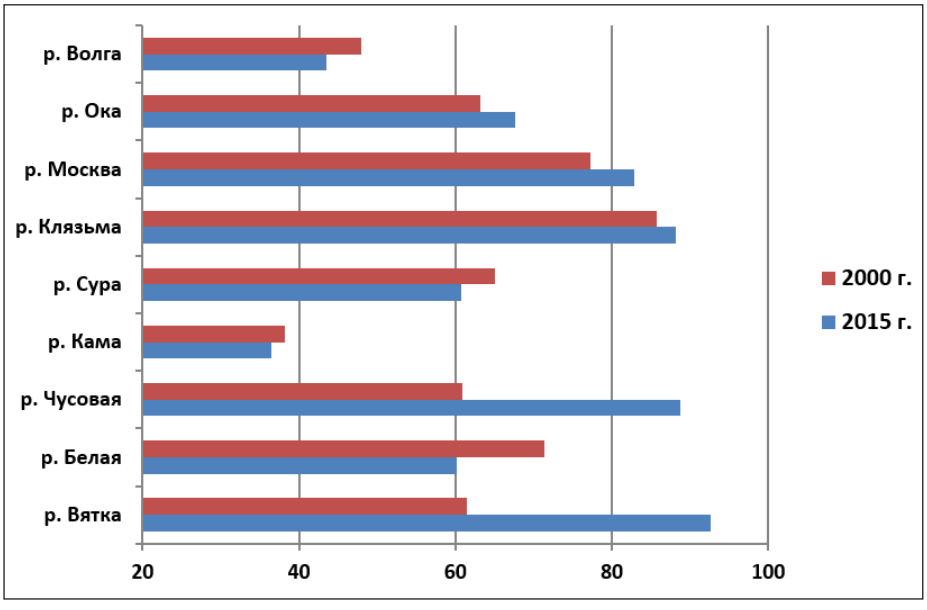

Рис. 1. Доля загрязненной воды в общем объеме сточной воды, %

В бассейне р. Оки за 2000–2015 гг. общий сброс сточных вод сократился в 1,55 раза, в бассейне р. Москвы – в 1,56 раза, в бассейне р. Клязьмы – в 1,63 раза, а в бассейне р. Суры — в 1,55 раза. Естественно, что сброс загрязненных сточных вод также заметно сократился. Однако на всех реках Верхней Волги наблюдается неблагоприятное соотношение загрязненных и нормативно-чистых вод. Так, в бассейне р. Оки удельный вес загрязненных сточных вод за 15 лет вырос с 63 до 68 %, а на ее крупнейшем притоке, р. Москве, – с 77 до 83 %. Наиболее загрязнены сточные воды в бассейне р. Клязьмы, где удельный вес загрязненных вод составляет 86–88 %. Лишь в бассейне р. Суры доля загрязненных сточных вод сократилась с 65 до 61 % (рис. 1).

За 2000–2015 гг. объем сброса сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод в водные объекты бассейна Камы снизился с 4,05 до 3,17 км^3 (1,28 раза). При этом доля загрязненных сточных вод снизилась незначительно (с 38,2 до 36,5 %). На всех притоках Камы наблюдается неблагоприятное соотношение загрязненных и нормативно-чистых вод. Так, в бассейне р. Чусовой удельный вес загрязненных сточных вод за 15 лет вырос с 61 до 89 %, в бассейне р. Вятки – с 61 до 93 %. За этот же период в бассейне р. Белой доля загрязненных сточных вод снизилась с 71 до 60 %.

В бассейне Нижней Волги объем сброса сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод в водные объекты также заметно сократился. Самое большое сокращение объема водоотведения наблюдалось в Оренбургской и особенно Астраханской областях. Вызвано это прежде всего резким сокращением объема коллекторно-дренажных вод с орошаемых земель.

Основной объем загрязненных сточных вод в 2015 г. сбрасывался предприятиями, производящими и распределяющими электроэнергию, газ и воду — 55 %, обрабатывающими производствами – 18 % (в первую очередь химическими, целлюлозно-бумажными и металлургическими), а также предприятиями по удалению сточных вод и отходов – 12 %.

К нормативно-чистым условно относят воды охлаждения с предприятий и коллекторно-дренажные воды с орошаемых и осушаемых земель. Фактически они наносят определенный ущерб гидрохимическому режиму водных объектов. Воды охлаждения, имея повышенную температуру, содержат и некоторое количество загрязняющих веществ (ЗВ), а коллекторно-дренажные воды несут в себе пестициды, соединения азота и фосфора. Нормативно-чистые воды составляют большую часть в суммарном водоотведении (62–63 %).

В настоящее время бóльшая часть загрязненных сточных вод сбрасывается в водоприемники без очистки или недостаточно очищенными. Наибольшие объемы загрязненных сточных вод на Верхней Волге сбрасывают города Москва, Нижний Новгород, Ярославль, Череповец, Иваново. В бассейне р. Камы наибольшие объемы загрязненных сточных вод приходятся на долю городов Уфа, Пермь, Набережные Челны, Стерлитамак. В целом по бассейну Волги объем сбрасываемых загрязненных сточных вод с 2000 по 2015 г. снизился с 8,35 до 5,47 км^3, или более чем в 1,5 раза. Казалось бы, можно улучшить качество очистки при столь существенном сокращении сбрасываемых стоков. Однако объем нормативно очищенных сточных вод на сооружениях очистки за этот период также сократился – с 743 до 579 млн м^3, или в 1,3 раза. При этом в бассейне р. Оки он сократился в 4,2 раза; в бассейне р. Москвы – в 2,7 раза; в бассейне р. Суры – в 3,6 раза; в бассейне р. Камы – в 2,7 раза; в бассейне р. Чусовой – в 6,2 раза, а в бассейне р. Вятки – в 84 раза. Лишь в бассейне р. Белой объем нормативно очищенных сточных вод вырос с 2,8 до 28,6 млн м^3.

В результате доля нормативно очищенной воды в общем объеме сточных вод, требующих очистки, за 15 лет в бассейне Волги выросла на очень незначительную величину – с 8,2 до 9,6 %, то есть до нормативов сейчас очищается только каждый десятый кубометр загрязненной воды. При этом в большинстве бассейнов крупных и средних рек доля нормативно очищенной воды в общем объеме сточных вод, требующих очистки, сократилась (рис. 2). Так, в бассейне р. Оки эта доля снизилась с 4,6 до 1,7 %, в бассейне р. Москвы – с 1,6 до 1,0 %, в бассейне р. Суры – с 2,7 до 1,0 %, в бассейне р. Камы – с 18,8 до 10,5 %, а в бассейне р. Вятки – с 16,8 до 0,3 %. Лишь в бассейне р. Клязьмы доля нормативно очищенной воды выросла до 1,4 %, а наибольший рост произошел в бассейне р. Белой – с 0,5 до 8,0 %.

Отраслевой анализ показывает, что из всех сточных вод, подлежащих очистке, нормативно очищается на обрабатывающих производствах 7,5 %, на предприятиях электроэнергетики – 12,8 %, в сельском хозяйстве – лишь 0,8 %. Это связано с рядом причин, по которым существующие очистные сооружения не способны обеспечить нормативную очистку. Самая высокая доля нормативно очищенных вод наблюдается на предприятиях транспорта и связи – 22,1 %.

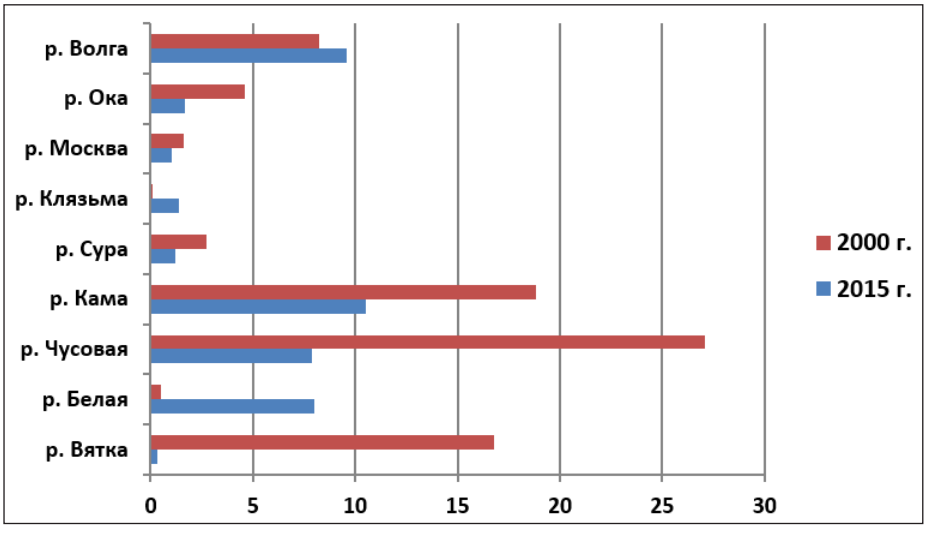

Рис. 2. Доля нормативно очищенной воды в общем объеме сточных вод, требующих очистки, %

Важную роль в интенсификации процесса снижения поступления ЗВ в водные объекты со сточными водами должно было сыграть увеличение ввода в эксплуатацию мощностей очистных сооружений. За период 2001–2005 гг. в среднем за год мощность станций для очистки сточных вод в России увеличивалась на 600 тыс. м^3 воды в сутки. За последующие 5 лет вводилось в среднем по 840 тыс. м^3 мощностей в год. За период 2011–2015 гг. ввод мощностей по годам был очень неравномерен, но в среднем в указанный промежуток времени ежегодно вводилось станций для очистки сточных вод мощностью 1300 тыс. м^3 воды в сутки в 2,2 раза больше, чем в начале века [9, 10].

Суммарная мощность очистных сооружений в бассейне р. Волги в 2015 г. достигла 14,99 км^3 и превысила уровень 2000 г. на 11 %. Из соотношения ее с объемом сточных вод, требующих очистки (6,05 км^3), следует, что общая мощность перекрыла потребность в 2,5 раза. Объем сточных вод, прошедших очистку, относительно объема, требующего очистки, составил в 2015 г. 91,4 %. Однако до нормы в этом году было очищено лишь 9,6 % вод, нуждавшихся в очистке.

Низкая эффективность работы очистных сооружений связана с устаревшим технологическим оборудованием и с традиционными схемами очистки, а также с нарушениями режимов очистки сточных вод. Основные мощности очистных сооружений сосредоточены в ЖКХ. Необходимо отметить, что 60 % сооружений этой отрасли перегружены, 40 % эксплуатируются 30 лет и более и требуют срочной реконструкции. Кроме того, 2 % городов, 16 % поселков городского типа и 95 % сельских населенных пунктов не имеют централизованных систем канализации. В 2015 г. 44 % имеющейся канализационной сети нуждалось в замене, а число аварий в системе канализации по сравнению с 2000 г. увеличилось на 45 %.

Сброс загрязнений в составе сточных вод

В связи со снижением объемов отводимых сточных вод, изменением их качественного состава, ростом мощности очистных сооружений значительный интерес представляет анализ динамики сбросов ЗВ [2]. По большинству ЗВ отмечается существенное снижение их сброса в водные объекты в 2015 г. по сравнению с 2000 г. (рис. 3). Наибольший эффект достигнут в снижении сброса меди. В целом по бассейну Волги количество сброшенной меди снизилось в 4 раза, а в бассейнах

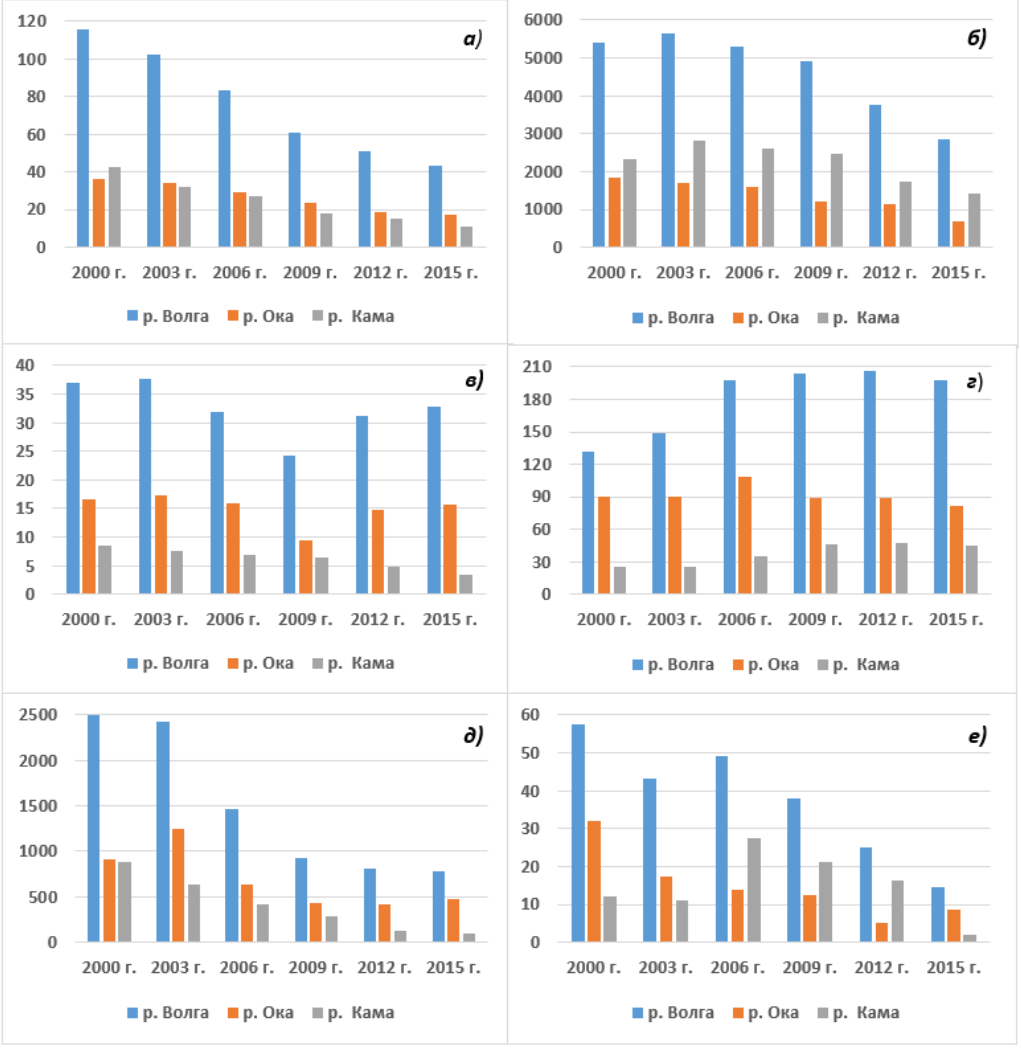

Рис. 3. Динамика сброса загрязняющих веществ в составе сточных вод в бассейнах рек Волги, Оки и Камы: *а* – БПК полный, тыс. т; *б* – сухой остаток, тыс. т; *в* – азот аммонийный, тыс. т; *г* – нитраты, тыс. т; *д* – нефтепродукты, т; *е* – медь, т

ее крупнейших притоков Оки и Камы соответственно в 3,7 и 5,8 раза. Количество нефтепродуктов в составе сточных вод сократилось за 15 лет в бассейнах Волги и Оки соответственно в 3,2 и 1,9 раза, а в бассейне Камы – более чем в 9 раз. Сброс аммонийного азота существенно снизился лишь в бассейне Камы – в 2,5 раза. Биохимическое потребление кислорода (БПК), являющееся одним из важнейших критериев уровня загрязнения водоема органическими веществами, сократилось в данных бассейнах в 2,1–3,9 раза. Количество сбрасываемых со сточными водами

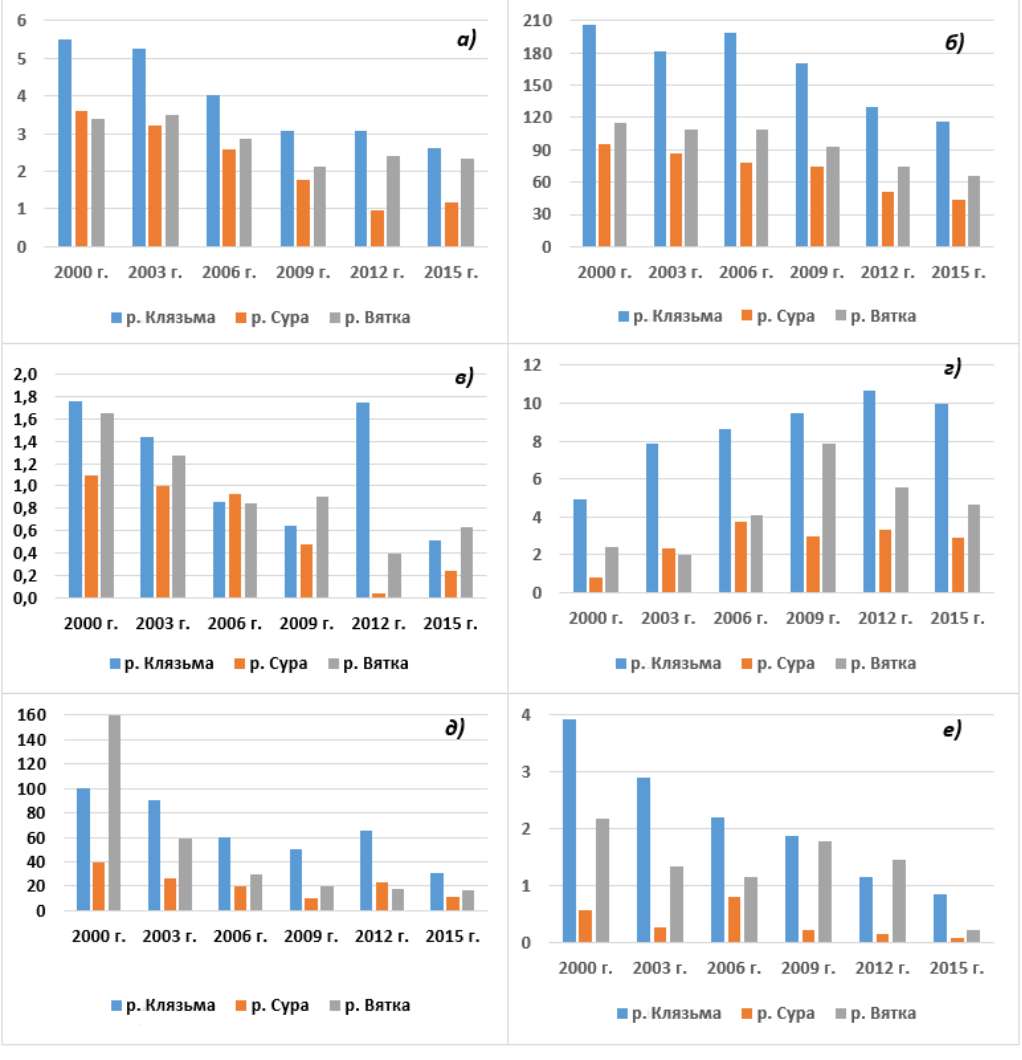

Рис. 4. Динамика сброса загрязняющих веществ в составе сточных вод в бассейнах рек Клязьмы, Суры и Вятки: *а* — БПК полный, тыс. т; *б* — сухой остаток, тыс. т; *в* — азот аммонийный, тыс. т; *г* — нитраты, тыс. т; *д* — нефтепродукты, т; *е* — медь, т

нитратов в бассейне Оки осталось почти неизменным, в бассейне Камы выросло в 1,8 раза, а в целом по бассейну Волги – в 1,5 раза.

Таким образом, хотя объем отводимых сточных вод снизился в бассейне Волги в 1,4 раза, а объем сточных вод, прошедших очистку, снизился на 31 %, количество основных сброшенных ЗВ сократилось в 2–4 раза. Это свидетельствует о том, что, несмотря на все вышеперечисленные недостатки в работе очистных сооружений, достигнут существенный эффект от проведения водоохранных мероприятий.

Аналогичные закономерности в снижении сброса ЗВ наблюдаются и в бассейнах менее крупных рек (рис. 4). В бассейне р. Вятки количество меди в составе сброшенных сточных вод сократилось в 10 раз, нефтепродуктов – в 9,5 раз, аммонийного азота – в 4,6 раза. За тот же период значительно увеличился сброс нитратов: в бассейнах рек Вятки и Клязьмы – в 2 раза, в бассейне р. Суры – в 3,5 раза.

Снизилась также и рассредоточенная по водосборной территории антропогенная нагрузка. Достаточно отметить, что количество вносимых органических и минеральных удобрений сократилось в целом по России с 1990 по 2014 г. в 6,3 и 5,2 раз соответственно. Количество пестицидов, поставляемых сельскохозяйственным производителям, за указанный период снизилось в 3 раза.

Изменение качества воды

Качественное состояние водных объектов, уровень их загрязненности оказывают прямое влияние на эколого-водохозяйственную обстановку в России. Сложившаяся практика крайне низкого финансирования водохозяйственных и водоохранных мероприятий обостряет проблему обеспечения населения и отраслей экономики качественной водой. В то же время деятельность по восстановлению устойчивого экологического состояния водных объектов требует все больших средств, так как значительно снижена их самоочищающая способность.

Исходя из приведенных выше данных о снижении в 2000-е годы объема загрязненных сточных вод и сброса ЗВ в водные источники, можно было бы ожидать ощутимого улучшения их качества. В бассейнах ряда рек по некоторым ингредиентам это произошло. Однако по большинству речных бассейнов состояние качества воды остается неудовлетворительным и по-прежнему не отвечает нормативным требованиям. Этот эффект вызван действием ряда неконтролируемых (рассредоточенных) источников загрязнения, а также источников вторичных (накопленных) загрязнений. По многим оценкам, именно они вносят основной вклад в загрязнение водных объектов.

Неконтролируемые источники находятся в основном вне системы контроля со стороны государственных органов, характеризуются нестационарностью режима и рассредоточенным поступлением ЗВ в водные источники. К ним относятся: поверхностный смыв с селитебных территорий, промплощадок, сельскохозяйственных угодий, а также водный транспорт, карьерные разработки, рекреация, свалки бытовых отходов, захоронения, атмосферные выбросы городов, промышленных объектов, транспорта, участившиеся случаи аварий и катастроф и пр.

Анализ динамики качества поверхностных вод выполнен на основе статистической обработки данных гидрохимической сети Росгидромета в 2015 г.

по наиболее характерным для каждого водного объекта показателям [5]. Наиболее распространенными ЗВ поверхностных вод остаются нефтепродукты, фенолы, легкоокисляемые органические вещества, соединения тяжелых металлов, аммонийный и нитритный азот.

В последнее десятилетие вода Верхне-Волжских водохранилищ, за исключением единичных створов, характеризуется как «загрязненная» и «очень загрязненная». Вода Рыбинского водохранилища в Вологодской области (ниже г. Череповца) стабильно оценивается как «грязная». К наиболее характерным загрязняющим веществам воды Верхне-Волжских водохранилищ, среднегодовое содержание которых в последние 10 лет изменяется, как правило, незначительно, относятся органические вещества, соединения меди, в отдельных створах – легкоокисляемые органические вещества. В Иваньковском и Угличском водохранилищах к ним добавляются соединения железа, у г. Дубны – фенолы. Комплексный анализ основных блоков экологического состояния Иваньковского водохранилища показывает ухудшение качества воды и деградацию водоема [1].

В течение последних 10 лет в воде Чебоксарского водохранилища преобладают «загрязненные» воды, которые в 2015 г. были зафиксированы в 67 % створов. Вода водохранилища в черте г. Нижнего Новгорода и ниже г. Кстово (Нижегородская обл.) на протяжении последних пяти лет стабильно оценивается как «грязная». Качество воды притоков всех Волжских водохранилищ варьирует, как правило, от «загрязненных» до «грязных». Вода отдельных водотоков характеризуется как «слабо загрязненная» (рек Вазузы, Шоши, Войи, озер Селигера и Плещеево).

Степень загрязненности воды р. Оки изменяется по течению. На участке реки, протекающей по территориям Орловской, Калужской и Тульской областей в течение многолетнего периода, вода изменялась от «загрязненной» до «очень загрязненной». В пределах Московской области ниже Серпухова качество воды ухудшалось до «грязной». Снижение качества воды реки ниже г. Коломны обусловлено не только воздействием загрязненных сточных вод города, но и поступлением загрязненных вод р. Москвы. Далее по течению реки вода характеризуется как «грязная».

Загрязненность воды р. Москвы возрастает от «загрязненной» на входе в Москву и «грязной» как в черте Москвы, так и ниже по течению в створе ниже Воскресенска. Вода большинства притоков р. Москвы по качеству оценивается как «грязная». На протяжении ряда лет критическими загрязняющими веществами воды как р. Москвы, так и ее притоков, являются аммонийный и нитритный азот, легкоокисляемые органические вещества.

Повышение эффективности работы Щелковских очистных сооружений после проведенной реконструкции способствовало улучшению качества воды р. Клязьмы на территории Московской области от «экстремально грязной» до «грязной» практически во всех створах наблюдений. Ниже по течению на территории Владимирской области вода реки стабильно оценивается как «грязная».

В многолетнем плане вода собственно р. Камы, каскада ее водохранилищ и притоков характеризовалась повышенным содержанием соединений марганца,

железа, меди и органических веществ. В 2015 г. вода р. Камы и ее водохранилищ оценивалась в основном как «загрязненная».

В бассейне р. Белой сохранилась повышенной повторяемость случаев загрязненности воды водных объектов нефтепродуктами, которая в 2015 г. достигла 44 %. Повышенное содержание соединений марганца и железа в основном определяется влиянием природных факторов, формирующих химический состав поверхностных вод региона, загрязненность нефтепродуктами обусловлена преимущественно организованным и неорганизованным их поступлением с объектов нефтегазодобычи и переработки, аграрного сектора, водосборных площадей. Вода р. Белой, за небольшим исключением, на всем протяжении характеризовалась как «грязная».

Среди притоков р. Камы и ее водохранилищ (без бассейна р. Белой) в последние годы превалировали «загрязненные» воды. В 2015 г., как и в прошлые годы, в бассейне р. Камы наиболее грязными являлись реки Косьва, Чусовая, Северушка, Иж, Позимь, Мензеля, вода которых характеризовалась как «грязная». Химический состав воды р. Чусовой формируется под влиянием сточных вод предприятий жилищно-коммунального хозяйства городов Полевского, Дегтярска, Ревды, Первоуральска, р. п. Староуткинска, в целом Первоуральско-Ревдинского промузла. Многие годы р. Чусовая относится к наиболее загрязненным среди притоков р. Камы и ее водохранилищ.

В течение многолетнего периода в Куйбышевском и Саратовском водохранилищах преобладают «загрязненные» воды. Более высокий уровень загрязненности воды («грязный») чаще всего отмечается на участке Куйбышевского водохранилища в районе Казани и Новочебоксарска. Характерный уровень загрязненности воды соединениями меди отмечался на большей части акватории Куйбышевского и в отдельных створах Саратовского водохранилищ. В 2015 г. вода Волгоградского водохранилища и р. Волги у Волгограда, как и в предыдущие годы, оценивалась как «загрязненная». По сравнению с вышеуказанными водохранилищами перечень характерных загрязняющих веществ воды возрастает до 4–5 ПДК. К ним относятся органические вещества, соединения меди и цинка, у г. Волгограда к ним добавляются фенолы.

Вода р. Волги ниже Астрахани в последние семь лет стабильно оценивается как «грязная». Число и перечень характерных загрязняющих веществ воды на этом участке реки остаются неизменными; среднегодовые концентрации изменяются незначительно и составляют: нефтепродуктов – 2–3 ПДК, соединений меди – 3–4 ПДК, цинка, железа, органических веществ – 1–2 ПДК. На этом участке реки сохраняется неустойчивой загрязненность воды нитритным азотом – до 4–6 ПДК.

Кроме того, значительный интерес представляют данные Роспотребнадзора по динамике качества вод [11]. В табл. 2 представлены характеристики состояния качества воды водоемов I категории, используемых в качестве источников питьевого и хозяйственно-бытового водопользования населения, для субъектов Федерации, не менее 30 % территории которых входит в бассейн Волги. В некоторых регионах волжского бассейна число отобранных проб в водоемах I и II категории было незначительным либо они вовсе не отбирались.

Таблица 2

Удельный вес исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по санитарно-химическим и микробиологическим показателям в водоемах I категории регионов бассейна р. Волги, %

Субъект Федерации	Санитарно-химические показатели			Микробиологические показатели		
	2000 г.	2010 г.	2015 г.	2000 г.	2010 г.	2015 г.
Вологодская обл.	45,0	20,2	16,2	15,9	10,0	7,1
Владимирская обл.	61,2	45,5*	80,0*	26,7	51,2	41,5
Ивановская обл.	16,1	30,2	31,3*	59,4	26,3	22,8
Калужская обл.	37,8*	33,3*	25,0*	13,4	15,7*	40,7*
Костромская обл.	3,3	27,3	12,9*	24,1	13,6	9,7
Московская обл.	39,3	28,8	28,6	26,1	27,4	25,0
Рязанская обл.	32,2	21,7	28,1*	33,7*	14,0	1,9
Тверская обл.	28,7	40,9*	26,6	25,3	33,0	19,7
Ярославская обл.	16,4	46,6	21,1	31,3	17,4	14,2
Республика Чувашия	14,1*	21,1*	18,3	27,6*	15,6	8,1
Кировская обл.	66,3	42,0	45,0	26,1	32,7	24,2
Нижегородская обл.	59,6	54,5*	38,2*	13,9	58,7	48,2*
Республика Татарстан	60,0*	19,2*	22,0*	15,0	20,8*	3,1*
Астраханская обл.	9,2	10,5	3,9	7,7	4,8	5,2
Волгоградская обл.	24,0	2,2	35,2	18,7	5,9	3,6
Оренбургская обл.	16,0	10,9	0,7	2,3	2,7	0,8
Пензенская обл.	24,9	24,1*	6,7*	15,3	63,6*	36,8*
Самарская обл.	47,0	24,6*	21,9*	19,1	23,9	26,9
Саратовская обл.	34,5	15,5	12,1	23,0	6,9	6,7
Ульяновская обл.	66,7*	51,2*	34,9	38,7	10,4*	33,3*
Республика Башкортостан	14,3	5,0*	26,8*	12,2	6,3	7,5
Удмуртская Республика	9,4	22,5*	21,9*	18,1	23,0	9,5
Пермский край	31,4	34,2	57,5	33,7	12,2	7,4
Челябинская обл.	15,3	22,3	31,8	9,3	6,0	11,3
Россия	27,6	23,3	23,3	23,4	18,2	16,0

* Общее число исследованных проб меньше 100.

Состояние источников централизованного питьевого водоснабжения и качество воды в местах водозабора изменяются медленно и продолжают оставаться неудовлетворительными. Удельный вес неудовлетворительных проб по санитарно-химическим показателям в водоемах I категории в 10 регионах даже увеличился и на более половине территорий был хуже, чем среднероссийский показатель. По микробиологическим показателям качество воды за 15 лет ухудшилось в семи регионах. В настоящее время удельный вес исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по микробиологическим показателям в водоемах I категории, в 10 регионах бассейна р. Волги (42 % представленных в табл. 2) хуже среднероссийского показателя. По паразитологическим показателям в 2015 г. не соответствовало санитарным требованиям 11,2 % проб

Таблица 3

Удельный вес исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по санитарно-химическим и микробиологическим показателям в водоемах II категории регионов бассейна р. Волги, %

Субъект Федерации	Санитарно-химические показатели			Микробиологические показатели		
	2000 г.	2010 г.	2015 г.	2000 г.	2010 г.	2015 г.
Вологодская обл.	48,1	32,4	23,1	29,6	18,5	13,3
Владимирская обл.	45,2	36,6	52,4	22,9	35,5	32,4
Ивановская обл.	17,6	10,6	46,8	32,4	35,7	46,4
Калужская обл.	20,3	19,8	32,7	9,3	18,4	28,0
Костромская обл.	9,9	37,0	28,5	11,3	42,9	8,7
Москва	61,7	54,0	39,0	53,5	71,3	57,7
Московская обл.	31,4	29,9	32,2	33,0	30,5	25,4
Орловская обл.	25,9	24,2	19,7	11,0	11,3	5,3
Рязанская обл.	20,5	24,8	27,1	27,4	16,8	12,9
Тамбовская обл.	6,8	16,6	5,9	13,5	27,3	5,8
Тверская обл.	10,2	35,2	28,1	24,6	43,9	45,0
Тульская обл.	31,0	47,2	26,5	27,7	17,6	11,6
Ярославская обл.	13,3	37,5	29,9	43,9	50,0	48,3
Республика Марий Эл	11,2	7,2	1,4	14,3	5,0	0,8
Республика Мордовия	16,7	24,8	15,4	6,2	22,2	14,8
Республика Чувашия	22,7	34,0	0,8	11,3	15,7	6,8
Кировская обл.	35,7	42,0	18,6	30,1	44,8	32,5
Нижегородская обл.	42,0	38,8	25,1	21,6	35,0	35,3
Республика Татарстан	23,0	24,9	18,3	18,9	26,9	16,2
Астраханская обл.	9,0	7,0	1,9	14,3	18,3	16,1
Волгоградская обл.	37,9	17,3	8,7	21,1	27,7	14,0
Пензенская обл.	17,9	12,9	22,5	3,2	26,1	29,8
Самарская обл.	48,6	27,1	17,4	19,9	26,8	29,7
Саратовская обл.	31,7	19,6	17,6	32,0	19,8	18,1
Ульяновская обл.	6,9	9,3	3,6	21,0	7,2	3,4
Республика Башкортостан	10,2	20,4	12,0	6,7	7,7	8,3
Удмуртская Республика	33,3	29,6	22,2	9,6	39,0	23,9
Пермский край	34,5	27,9	28,1	17,6	19,9	38,7
Россия	25,7	26,5	22,0	20,9	25,9	23,3

во Владимирской, 4,2 % – в Тверской и 2,8 % – в Кировской областях, что существенно превышало общероссийский уровень (0,6 %).

Качество воды водоемов II категории, находящихся в местах рекреации населения, отличается от качества воды водоемов I категории (табл. 3). Удельный вес исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по санитарно-химическим показателям в водоемах II категории по тому же списку регионов бассейна р. Волги, которые представлены в табл. 2, в среднем

на 3 % ниже, чем доля проб в водоемах I категории. Однако по микробиологическим показателям качество воды водоемов II категории значительно уступает качеству воды водоемов I категории – доля неудовлетворительных проб на 9,6 процентных пункта выше.

По санитарно-химическим показателям качество воды водоемов II категории за 15 лет ухудшилось в 10 регионах и на более чем половине территорий волжского бассейна было хуже, чем в среднем по России. По микробиологическим показателям качество воды за тот же срок ухудшилось в 16 регионах и было хуже среднероссийского уровня почти на половине территорий бассейна. По паразитологическим показателям в 2015 г. не соответствовало санитарным требованиям 7,4 % проб во Владимирской, 2,2 % – в Тамбовской, 2,7 % – в Тверской, 4,7 % – в Ярославской, 1,7 % – в Кировской, 3,4 % – в Саратовской областях, а также 1,6 % – в Удмуртской Республике и 3,3 % – в Республике Чувашия при среднероссийском уровне 1,1 %.

Практически все водные объекты бассейна Волги подвержены антропогенному воздействию. Степень загрязненности воды реки в целом устойчиво сохраняется на уровне прошлых лет. Неблагополучно состояние малых рек, особенно в зонах крупных промышленных центров из-за поступления в них с поверхностным стоком и отработанными сточными водами большого количества ЗВ. В сельской местности значительный ущерб малым рекам наносится из-за нарушения режима хозяйственной деятельности в водоохранных зонах и смыва в водотоки органических и минеральных веществ, пестицидов, частиц почвы в результате водной эрозии.

Итак, несмотря на снижение контролируемой массы поступающих ЗВ, улучшения качества вод в целом не наблюдается. Это можно объяснить следующими причинами: значительными запасами ЗВ в почвах, грунтах и донных отложениях; продолжающимся увеличением загрязненности урбанизированных территорий; усиливающейся интенсивностью эрозионных процессов и увеличением твердого стока в поверхностные водные объекты; участившимся нарушением водного законодательства; ростом чрезвычайных ситуаций в результате аварий и катастроф в промышленности, ЖКХ и на транспорте [7].

В настоящее время экономические инструменты регулирования водопользования недостаточно мотивируют водопользователей к проведению водоохранных мероприятий. Современный уровень платы за сброс сточных вод очень низок, субъектам хозяйственной деятельности более выгодно осуществлять платежи за допустимые сбросы или платить незначительные штрафы за их превышение, чем снижать сброс загрязняющих веществ путем повышения эффективности очистных сооружений, внедрения малоотходных и безотходных технологий и т. п.

За 2005–2015 гг. сумма платежей за негативное воздействие на водные объекты выросла с 3,22 до 4,92 млрд руб. в номинальном исчислении, или на 53 % [4]. Однако с учетом фактического роста цен указанное увеличение было существенно меньшим. Помимо значительного увеличения бюджетного финансирования, охране вод нужны другие инструменты, в том числе нерыночного характера.

Выводы

Поставленные ранее цели по доведению доли оборотного водоснабжения в промышленности до 85–90 % не выполнены. Коэффициент водооборота в целом по бассейну Волги за 2000–2015 гг. увеличился лишь с 81,3 до 82,8 %.

В результате сокращения водопотребления в жилищно-коммунальном, сельском хозяйстве и промышленности сброс сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод в поверхностные водные объекты в целом по бассейну Волги сократился за 15 лет с 17,4 до 12,6 км^3 (в 1,4 раза). Доля загрязненных вод в общем объеме отводимых вод сократилась с 48 % в 2000 г. до 43,5 % в 2015 г., но на многих притоках Волги она выросла.

Объем нормативно очищенных сточных вод на сооружениях очистки за этот период также сократился – с 743 до 579 млн м^3, или в 1,3 раза. До нормативов сейчас очищается только каждый десятый кубометр загрязненной воды.

Количество основных загрязняющих веществ, сброшенных со сточными водами, за 2000–2015 гг. существенно снизилось. Сброс меди снизился в 4 раза, нефтепродуктов – в 3,2 раза, сухого остатка – в 1,9 раза. Лишь сброс нитратов вырос в 1,5 раза. Снизилась также и рассредоточенная по водосборной территории антропогенная нагрузка – количество вносимых органических и минеральных удобрений, пестицидов и пр.

Несмотря на снижение контролируемой массы поступающих ЗВ, улучшения качества поверхностных и подземных вод в целом не наблюдается.

Литература

1. *Веницианов Е.В., Кирпичникова Н.В.* Современные экологические проблемы Иваньковского водохранилища – источника водоснабжения г. Москвы // Экология речных бассейнов: Тр. 8-й Межд. науч.-практ. конф. – Владимир: Араим, 2016. – С. 325–330.
2. *Водные* ресурсы и водное хозяйство России в 2015 году: стат. сб. / под ред. Н.Г. Рыбальского и А.Д. Думнова. – М.: НИА-Природа, 2016. – 267 с.
3. *Возрождение* Волги – шаг к спасению России / под ред. И.К. Комарова. – М.; Н. Новгород: Экология, 1996. – 464 с.
4. *Государственный* доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2015 году». – М.: НИА-Природа, 2016. – 270 с.
5. *Государственный* доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2016. – 639 с.
6. *Демин А.П.* Эффективность использования водных ресурсов в бассейне Волги // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 6. – С. 653–663.
7. *Демин А.П.* Использование водных ресурсов России: современное состояние и перспективные оценки: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – М., 2011. – 48 с.
8. *Отчет* о НИР по теме 12фцп-Н8-01 «Обобщение по территории Российской Федерации данных гидрологического мониторинга в виде справочных изданий и актуализированных карт расчетных гидрологических характеристик рек бассейнов Верхней Волги, Камы и Нижней Волги». – М.: ИГ РАН, 2013. – 326 с.
9. *Охрана* окружающей среды в России. 2006: стат. сб. – М.: Росстат, 2006. – 239 с.
10. *Сайт* Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gks.ru.
11. *Сайт* Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rospotrebnadzor.ru.

УДК 502.131.1:[502.211+332.012.2]

В.В. Дмитриев**, А.Н. Огурцов*

УСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ: МЕТОДОЛОГИЯ, ОЦЕНКА, РЕЗУЛЬТАТЫ

* Санкт-Петербургский государственный университет; ** Санкт-Петербургский государственный университет / Российский государственный гидрометеорологический университет, vasiliy-dmitriev@rambler.ru

V.V. Dmitriev, A.N. Ogurtsov

SUSTAINABILITY OF COMPLEX SYSTEMS IN NATURE AND SOCIETY: METHODOLOGY, EVALUATION, RESULTS

Рассматриваются методология, методы, модели, результаты оценки устойчивости сложных систем в природе (наземные и водные эко- и геосистемы) и обществе (социо-эколого-экономические системы и их подсистемы), а также этапы построения интегральных показателей устойчивости. В качестве методической основы акцентируется использование АСПИД-методологии и моделей устойчивости. Обобщаются результаты интегральной оценки устойчивости водных объектов, наземных ландшафтов, социо-эколого-экономических систем (СЭЭС) и их свойств, реализованные в рамках выполнения научных проектов и грантов последних лет.

Ключевые слова: *устойчивость, интегральная оценка, модели-классификации, результаты интегральной оценки устойчивости.*

The methodology, methods, models, and the results of the assessment of the stability of complex systems in nature (terrestrial and aquatic eco- and geosystems) and society (socio-ecological and economic systems and their subsystems) are considered. Stages of construction of integral indicators of stability are considered. As a methodical basis, the use of ASPID methodology and stability models is emphasized. The results of the integral assessment of the stability of water bodies, terrestrial landscapes, socio-ecological and economic systems and their properties, implemented within the framework of scientific projects and grants are generalized.

Keywords: *stability, integral estimation, model-classification, results of integral stability estimation.*

Введение

В настоящее время при оценивании качества сложных систем и их эмерджентных свойств исследователи прибегают к использованию различных методик. В основе методик интегрального оценивания систем и их свойств лежит представление об объекте окружающей среды как о многопараметрической сложной системе, то есть его качество и свойства характеризуются набором исходных параметров (характеристик). На первый план ставятся вопросы интеграции исходных характеристик, которые могут быть весьма многочисленны и отражать различные аспекты функционирования как природных систем и объектов, так и социально-экономических или социо-эколого-экономических систем и их подсистем. Примером могут служить различные по масштабу геосистемы (природно-территориальные

комплексы), как наземные, так и водные, а также их подсистемы; социосистемы и их подсистемы. В качестве предмета исследования (оцениваемой системы, ее качества или свойства) могут выступать: экологическое состояние, устойчивость, уязвимость, экологическое благополучие, экологическая целостность, экологическая напряженность, качество жизни населения, оценка мультиопасных явлений (мульти-ОЯ, multi-hazards) и рисков (мультириски) при определении интегрального риска от совокупности опасных явлений в целом и т. д.

В исследованиях акцентируются как простые (аддитивные) свойства систем (масса, биомасса, численность, концентрация, объем, площадь и др.), так и сложные (неаддитивные) свойства систем (устойчивость, уязвимость, благополучие, напряженность и др.), которые часто именуют эмерджентными.

Анализ геосистем в науках о Земле на начальном этапе традиционно сопровождается анализом пространственно-временных изменений их аддитивных свойств. Это способствует появлению целого ряда публикаций, в которых авторы, рассматривая сложную систему или сложное системное свойство, предлагают оценивать его на основе информации о компонентном составе системы (как правило, выбираются один-два компонента, характеризующих химический или биологический состав системы) или о факторе, влияющем на сложное системное свойство. Для этого авторами часто используется известная формулировка принципа «бритвы Оккама»[1]. Так, например, часто предлагалось оценивать трофический статус водных экосистем, их устойчивость и др. Методологически такой подход не является оправданным, поскольку принцип простоты относится к сложной системе или к сложному системному свойству. При этом элементом системы должен выступать не компонент состава или фактор, а ее подсистема. Принцип простоты позволяет соподчинить друг другу как естественные, так и искусственные системы так, что свойства систем некоторого уровня выводятся (объясняются) на основе уже изученных свойств и связей систем нижестоящего уровня иерархии. Такой принцип в системологии получил название принципа иерархической организации сложных систем или принципа интегративных уровней.

Наиболее распространенные, получившие широкую известность методики оценки состояния природных систем базируются на балльном или балльно-индексном подходе. Например, для комплексной оценки геохимической устойчивости почвенного покрова к загрязнению нефтяными углеводородами используется не менее 10 характеристик, отражающих процессы деструкции (биохимического окисления), аккумуляции, выноса и рассеивания нефтяных углеводородов. На идеях и принципах балльной системы оценки построены исследования сотрудников Института проблем освоения Севера СО РАН [12, 17], ВНИИприроды [4] и др. За рубежом в рамках концепции «Nordicity» широкую известность получила

[1] Принцип «бритвы Оккама», известный в науке как «принцип бережливости», «принцип простоты» или «принцип лаконичности мышления», был сформулирован в XIV в. английским философом Уильямом Оккамом в следующем виде: *frustra fit plura, quod fieri potest pauciora* – «не следует делать посредством большего то, чего можно достичь посредством меньшего» (Бирюков, Широков, 1968; Лем, 1968; Флейшман, 1982; цит. по Розенберг, 1984 [16]). Иногда переводят: «Не преумножайте сущности бытия». Этот же принцип проглядывается и в известном лозунге И. Ньютона: «Гипотез я не придумываю!».

балльная система оценки, предложенная канадским географом Л.-Э. Амелиным (Louis-Edmond Hamelin).

В современном ландшафтоведении акцентируются «условия возникновения особых эмерджентных пространственных эффектов» в ландшафтах. Вводится термин «эмерджентный эффект пространственной структуры». Названы примеры таких эффектов: микроклимат, режим стока, жизнеспособность популяций животных, биопродуктивность, сочетание антропогенных воздействий, сочетание естественных и антропогенных воздействий, например, в виде моделей интегральных оценок или мультирисков и др. На наш взгляд, эти примеры относятся в первую очередь к подсистемам ландшафта. Каждая из подсистем сохраняет свои свойства и параметры режимов или не способна к сохранению своих свойств и параметров режимов во времени и пространстве после оказанных воздействий (естественных или антропогенных или и тех, и других). Если система сохраняет свои свойства и режимы функционирования, тогда она устойчива. Если не сохраняет (переходит в другой класс), то теряет устойчивость (потеря устойчивости может обнаружиться как во времени, так и в пространстве). Сложность анализа состоит в том, что сохранение свойств и режимов может быть вызвано как естественными причинами, так и антропогенным воздействием. Это требует учета и тех, и других в оценочных исследованиях. Кроме этого успешность получения результата зависит от умения авторов выделять граничные состояния между классами исследуемых свойств по совокупности параметров.

В связи с этим можно обратить внимание на сам термин «эмерджентный эффект пространственной структуры» и отметить, что само эмерджентное свойство ландшафта (устойчивость, целостность, благополучие и др.), отражающее системные свойства, в нем не названо. Следуя логике нашей работы, мы бы сказали «эмерджентный эффект устойчивости системы» или другого свойства, вызван временными или пространственными изменениями элементов режимов в ландшафте, поскольку эмерджентный эффект присущ системе в целом, но не ее компоненту или структуре по отдельности.

Авторами статьи в качестве методологической основы интегрального оценивания при решении широкого круга задач в рамках исследований и работ по проблеме интегральной оценки объектов окружающей среды используются идеи и принципы АСПИД-методологии (анализ и синтез показателей при информационном дефиците) [19], на которых построены модельные алгоритмы программы Geo-expert [3].

Анализируя возможности оценки устойчивости социо-эколого-экономических систем, авторы пишут о том, что к настоящему моменту накоплен значительный методологический и практический опыт в данной области, но на сегодня еще не сформирован общепринятый теоретико-методологический подход к анализу и оценке устойчивого развития [10]. Выделяется работа комиссии Стиглица−Сена−Фитусси (2009) и ее «Доклад об измерении экономического развития и социального прогресса», в котором предложены рекомендации по формированию статистического инструментария оценки качества жизни и социальной устойчивости [10]. Действительно, идеи и выводы данного доклада вызвали широкий общественный резонанс [10]. Вскоре после этого в докладе Еврокомиссии «ВВП

и за его пределами» (2009) были сформулированы предложения по совершенствованию показателей социального прогресса. ОЭСР предложила свою разработку «Компендиум индикаторов благосостояния» (2011) на основе рекомендации доклада Стиглица−Сена−Фитусси. Интерес к проблеме формирования полной и объективной системы индикаторов общественного благосостояния и устойчивого развития был проявлен правительствами Франции, Японии, КНР и США, Германии, Норвегии и других стран. Таким образом, в настоящее время можно говорить о том, что международный интерес к проблеме оценки устойчивого развития очень высок, а методология его измерения находится в стадии становления [10]. В работе [10] предложено авторское определение понятия устойчивости социо-эколого-экономической системы, характеризующее ее как подсистему в системах более высокого порядка: макрорегиональной и национальной. Следуя автору, «социо-эколого-экономическая устойчивость представляет собой свойство системы достигать поставленные социальные и экономические цели в условиях трансформации внешней среды, сохраняя свой внутренний потенциал и основные параметры природного окружения» [10]. Заметим, что достигать поставленные цели и сохранять свои свойства и параметры режимов при внешнем воздействии − разные понятия. В понимании авторов речь, скорее, идет о близости системы к некоему «идеальному» состоянию, заданному параметрически в виде свертки показателей, с которым сравнивается состояние исследуемой системы и определяется их близость.

В нашем понимании и русле статьи речь должна идти не о социо-эколого-экономической устойчивости, а об устойчивости социо-эколого-экономической системы как интегративном (сложном, эмерджентном) свойстве социосистемы, под которой нами понимается динамическая саморазвивающаяся и саморегулирующаяся система «человеческое общество − природа» или «человеческое общество − окружающая среда», динамическое равновесие в которой должно обеспечиваться общественным разумом. Условная формула такой системы была представлена нами следующим образом: социосистема = биоценоз(ы) + физико-географическая среда (биотопы) + население + экономика + культура + политика. Или: социосистема (социоэкосистема) = геосистема (геоэкосистема) + экономика + культура + политика.

В другой работе автор предлагает измерять устойчивость на основе двух основных подходов: «индикаторном» и через «расчет интегрального индекса, позволяющего получить комплексную оценку устойчивости социально-экономического развития» [18, с. 143]. Под устойчивым развитием автором понимается «совокупность процессов позитивных изменений и воплощающих их технологий, направленных на гармонизацию взаимодействия с экономической, экологической и социальной сферами для удовлетворения потребности социо-эколого-экономической системы в долгосрочном будущем периоде» [2, 30]. Далее автор предлагает использовать метод динамических нормативов для оценки устойчивости развития. Данный метод основан на определенном упорядочении показателей динамики. «Порядок показателей динамики наблюдаемых параметров характеризует происходящие в системе структурные изменения. Следовательно, выбирая и упорядочивая определенным образом наблюдаемые параметры системы, можно построить эталонную модель изменения ее структурных характеристик. Измерить

результативность деятельности можно посредством сравнения эталонного и фактического режимов функционирования хозяйственной системы», − пишет автор [18, с. 144]. Далее строится матрица фактического упорядочения показателей экономической составляющей развития для Российской Федерации за 2005−2011 гг. и делается вывод о том, что по экономической составляющей в среднегодовом исчислении за 2005−2011 гг. мера сходства соотношений динамики показателей устойчивого развития РФ составила 79,2 %. Это означает, по мнению автора, что «за исследуемый период средние темпы роста базовых экономических показателей более-менее сбалансированы между собой» [18, с. 148].

Можно согласиться с автором в том, что в работе предложена комплексная оценка динамики отдельных показателей развития страны на определенном временном интервале. Но как эти показатели характеризуют способность системы в целом сохранять свои свойства и параметры режимов функционирования при внешних воздействиях на систему или переход системы в другой класс, с лучшими или худшими условиями состояния социо-эколого-экономической системы или качества жизни населения? И здесь встречается интерпретация показателей устойчивого развития, которая состоит в покомпонентном анализе динамики или изменчивости показателей, отражающих состав и свойства систем. При этом авторы уже не акцентируют тот момент, что они исследуют устойчивость системы в целом (или ее подсистем). Реализуется сравнение некоторого эталона (нормы) по отдельным индексам с индексами, рассчитанными по реальным статистическим данным за ряд лет. В этом случае обнаруживается, что по одному индексу (или критерию) система попадает в один класс, а по другому (другим) – в другой (другие) классы. Как вариант задается траектория изменения индекса, характеризующая, например, экономическое благополучие страны, и в итоге получается более-менее сбалансированный темп роста базовых показателей. Такой вывод, на наш взгляд, не дает возможности отнести систему к определенному классу состояния (благополучия, устойчивости) и выявить реакцию системы в целом на внешнее воздействие или внутреннюю трансформацию, обусловленную, например, социальными или политическими факторами.

Методика исследования

Методическая процедура интегральной оценки состоит из определенной последовательности этапов (шагов). На первом этапе работ проводятся структуризация всей имеющейся информации и формирование матрицы исходных характеристик вида

$$\begin{vmatrix} x_1^{(1)}, \dots x_i^{(1)}, \dots x_m^{(1)} \\ x_1^{(j)}, \dots x_i^{(j)}, \dots x_m^{(j)} \\ x_1^{(k)}, \dots x_i^{(k)}, \dots x_m^{(k)} \end{vmatrix}.$$

Здесь $x_i^{(j)}$ – значение *i*-й характеристики $\left(i = 1, 2, 3, 4 \dots m\right)$ качества или свойства для *j*-го объекта.

Определяются шкалы измерений по каждой из характеристик с указанием предельных значений ($x_{\min}$, $x_{\max}$) и указываются способы измерения исследуемого качества по каждой характеристике (критерию). На этом же этапе при необходимости все множество исходных характеристик разбивается на подмножества (группы характеристик, которые в публикациях названы блоками), и тогда организуется иерархическая схема последовательного синтеза интегральных показателей различного уровня.

На следующем шаге строится вектор отдельных показателей (индексов) $q_1, \ldots, q_m$ и формируется матрица вида

$$\begin{vmatrix} q_1^{(1)}, \ldots q_i^{(1)}, \ldots q_m^{(1)} \\ q_1^{(j)}, \ldots q_i^{(j)}, \ldots q_m^{(j)} \\ q_1^{(k)}, \ldots q_i^{(k)}, \ldots q_m^{(k)} \end{vmatrix}.$$

Здесь $q_i^{(j)}$ – значение i-го отдельного показателя $\left(i = 1, 2, 3, 4 \ldots m\right)$ качества или свойства для j-го объекта $\left(j = 1 \ldots k\right)$.

Каждый отдельный показатель характеризует лишь отдельную сторону качества объекта и представляет собой функцию исходных характеристик в форме

$$q_i = q_i\left(x_i\right) = q_i\left[\varphi\left(x_i\right)\right], \quad 0 \le q_i \le 1, \quad i = 1, \ldots, m,$$

где $q_i(x_i)$ – нормирующие функции.

Существуют различные варианты модификации нормирования исходных характеристик. В нашем случае в зависимости от характера поведения в качестве нормирующей функции используются возрастающая или убывающая функции:

$$q_i = q_i\left(x_i\right)\begin{cases} = 0, & x_i \le x_{\min} \\ = \left(\left(x_i - x_{\min}\right) / \left(x_{\max} - x_{\min}\right)\right)^p, & x_{\min} \le x_i \le x_{\max} \\ = 1, & x_i \ge x_{\max} \end{cases}$$

$$q_i = q_i\left(x_i\right)\begin{cases} = 1, & x_i \le x_{\min} \\ = \left(\left(x_{\max} - x_i\right) / \left(x_{\max} - x_{\min}\right)\right)^p, & x_{\min} \le x_i \le x_{\max} \\ = 0, & x_i \ge x_{\max} \end{cases}$$

Параметр p указывает на характер выпуклости нормирующей функции. Опыт показывает, что при нормировке часто достаточно ограничиться линейной зависимостью (p = 1). Множество значений отдельных показателей q_i представляет собой многокритериальную оценку качества (свойства) исследуемой системы (объекта). Необходимо отметить, что проблема несравнимости многокритериальных оценок качества, для решения которой на следующем этапе работ осуществляется выбор-построение *синтезирующей функции*, сопоставляющей вектору отдельных (нормированных) показателей значение *интегрального показателя*, характеризует исследуемое качество (свойство) в целом.

В качестве такой модельной функции в нашем случае, чаще всего, используется функция вида $Q = Q(q; w) = \sum_{i=1}^{n} q_i w_i$, с помощью которой свертываются отдельные показатели качества в единый *интегральный показатель* (индекс). При этом синтезирующая функция зависит от вектора весовых коэффициентов $w = (w_1, ..., w_n)$, определяющих значимость отдельных показателей для интегральной оценки. Диапазон изменений индекса находится в интервале от 0 до 1. Индекс конструируется так, чтобы максимальные значения (близкие к единице) свидетельствовали о высокой степени качества, а близкие к нулю − о низкой (можно наоборот).

Поскольку существует неопределенность выбора единственного вектора весовых коэффициентов, в расчетах используется байесовская модель рандомизации, позволяющая перейти от неопределенности выбора весовых коэффициентов к их случайному выбору [19]. Для этого исследователю необходимо задать только приоритеты показателей качества. Далее необходимо отметить, что при генерации весовых коэффициентов используется алгоритм формализации нечисловой, неточной и неполной информации, основанный на методе последовательного перебора в лексикографическом порядке монотонных путей, заданных на целочисленной решетке и взаимно однозначно определяющих соответствующий вектор весовых коэффициентов [19]. В результате в качестве числовой оценки конкретного вектора весовых коэффициентов принимается математическое ожидание рандомизированного весового коэффициента. Точность такой оценки характеризуется стандартным отклонением рандомизированного весового коэффициента. Использование вектора рандомизированных весовых коэффициентов в функции свертки отдельных показателей приводит к получению рандомизированных интегральных показателей с аналогичными статистическими характеристиками.

Поскольку оцениваемые объекты носят географический (пространственный) характер, то важным этапом исследований является необходимость разноаспектной визуализации результатов на основе использования ГИС-технологий. При этом ГИС выступает в качестве инструмента пространственного моделирования и анализа интегральных оценок.

Результаты исследований

Проработка и тестирование функциональных возможностей АСПИД-методики для решения эколого-географических задач во второй половине 1990-х гг. позволили получить первые результаты по оценке качества природных вод, трофического статуса водных экосистем, благоприятности природных условий макрорегионов северо-запада РФ для жизни людей [15], токсического загрязнения воды и грунтов [8], экологического состояния и качества среды урбанизированных территорий [1].

К настоящему времени авторами накоплен значительный опыт по интегральной оценке качества объектов окружающей среды, неаддитивных свойств сложных систем в природе и обществе. В практическом плане при решении прикладных задач в рамках проведения инженерно-экологических изысканий получены

оценки экологического состояния, выполнено зонирование городской территории, оценена устойчивость почвенного покрова к загрязнению нефтяными углеводородами [11, 13], выявлено экологическое благополучие аквальных экосистем, оценена устойчивость растительного покрова в зоне активного техногенного воздействия с использованием ГИС-технологий и устойчивость почвенного покрова к загрязнению тяжелыми металлами [14].

Накопленные данные позволили развить теоретические знания, которые легли в основу публикаций последних лет и разработки моделей интегральной оценки устойчивости наземных и водных ландшафтов и социо-эколого-экономических систем [5−7, 9].

В качестве примера рассмотрим некоторые результаты оценочных исследований последних лет, изложенные в отчетах по НИР и грантам.

Оценка устойчивости экосистем внутренних водоемов суши. Для оценки устойчивости озер использовался балльно-индексный подход и методы интегральной оценки. В период летних полевых исследований был продолжен мониторинг параметров, формирующих устойчивость экосистем малых озер карельского Приладожья. В экспериментах удалось показать, что на основе балльно-индексного подхода можно идентифицировать влияние изменения параметров естественного и антропогенного режимов на устойчивость системы. На примере анализа наблюдений 2015 и 2016 гг. показано, что увеличение уровня воды в озере в 2016 г. инициировало снижение продуктивности водоема и повышение уязвимости системы к изменению параметров естественного режима и эвтрофированию (устойчивость 1-го типа). Использование метода интегральной оценки позволило утверждать, что увеличение уровня воды в озере снизило устойчивость озерной системы к изменению параметров естественного режима и качества воды. Интегральная оценка другого эмерджентного свойства системы, в котором устойчивость является влияющим на экологическое благополучие (ЭБ) фактором, показала, что для 2010–2016 гг. ЭБ озера Суури оценено II-м классом (выше среднего). При этом значения интегрального показателя ЭБ незначительно изменялись внутри II-го класса (правая граница) или попадали в левую границу III класса. Сделан вывод о том, что экосистема озера способна сохранять высокий класс ЭБ достаточно длительное время.

Оценка устойчивости водотоков и оценка ЭБ речных систем. Под речной системой понималась система «водоток + водосбор». Под экологически благополучной речной системой понималась система, способная продуцировать органическое вещество, выполнять социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (средо- и ресурсовоспроизводства), являющаяся разнообразной по составу биоты, чистой (по химическому составу воды и гидробиологическим критериям качества воды), устойчивой к изменению естественного и антропогенного режимов, способной к самоочищению. Таким образом, устойчивость является одним из факторов ЭБ речной системы. На первом этапе рассматривалась только устойчивость водотока (реки), не учитывалась устойчивость наземного ландшафта водосборной территории. Для построения интегральных показателей ЭБ использовался метод сводных показателей (МСП), который дает возможность на основе существующих представлений об ЭБ разработать

модель-классификацию ЭБ, которая включает в себя оценочные шкалы и классы ЭБ. Учитывались 5 групп характеристик и 2 уровня свертки показателей. В результате были разработаны 3 модели, отличающиеся количеством параметров оценивания. Интегральный показатель рассчитывался как сумма нормированных значений характеристик с учетом их весомости. На этапе 2016 г. для всех моделей задавались равные приоритеты при свертке показателей на 1-м (внутри блоков) и 2-м (между блоками) уровнях. Нормирующие функции учитывали вид связи (прямая или обратная). В «модели 1» использовалось 72 параметра оценивания, которые были разделены на 5 основных блоков. В «модели 2» количество параметров было уменьшено до 50, в «модели 3» − до 28. Это уменьшение было обусловлено как несовершенством современного мониторинга рек (отсутствием данных по большому перечню параметров), так и необходимостью проверки того, как уменьшение параметров скажется на результатах оценивания. В итоге было выявлено, что сокращение параметров не привело к искажению результатов или переходу системы в другой класс ЭБ. Было реализовано несколько этапов исследования моделей [19].

Оценка устойчивости наземных ландшафтов. Рассмотрены существующие представления различных научных школ на проблему оценки устойчивости ландшафтов [5, 7]. Был обобщен предшествующий опыт построения моделей-классификаций для интегральной оценки устойчивости наземных ландшафтов. Рассмотрены: балльная оценка устойчивости; использование индикаторного подхода и индексологии в оценке устойчивости; многокритериальное оценивание по совокупности небольшого числа индексов; новые модели-классификации для интегральной оценки на основе построения сводных показателей. Выявлены недостатки балльного метода, который, по мнению авторов статьи, относится к комплексным оценкам, а не к интегральным, как это часто делают авторы в современных публикациях. Выполнен анализ развития индикаторного подхода и индексологии для оценки устойчивости. Предложены модели, агрегирующие следующие признаки: 1 − годовой радиационный баланс; 2 − радиационный индекс сухости; 3 − индекс биологической эффективности климата; 4 − ветровой режим (количество дней со штилями за год); 5 − ветровой режим (количество дней с сильными ветрами за год); 6 − интенсивность геоматических процессов (аддитивный учет показателей или их независимое включение в модель: неотектоническая активность, сейсмичность, тип рельефа, свойства пород); 7 − устойчивость составных частей ландшафта (доминантных и детерминантных урочищ); 8 − контрастность урочищ в ландшафте; 9 − защищенность грунтовых вод; 10 − устойчивость ландшафтов к упрощению структуры почвенно-растительного покрова; 11 − индекс устойчивости ландшафтов к загрязнению тяжелыми металлами; 12 − индекс устойчивости ландшафтов к закислению; 13 − устойчивость ландшафтов к эрозионному смыву почв. Получены шкалы сводных показателей устойчивости при равновесном учете названных факторов. Использование модели возможно на основе метода сводных показателей или метода рандомизированных сводных показателей в среде ГИС. Это позволило получать результаты районирования или зонирования территорий по величинам интегральных показателей, прослеживать их временную динамику и пространственные различия.

Оценка устойчивости наземных ландшафтов на основе их подсистем (растительный покров, почвенный покров). В рамках данного направления рассмотрены существующие подходы к оценке устойчивости (устойчивость почв, устойчивость растительного покрова к пожарам, опасность экзогенных природных процессов и риск от природных и техноприродных процессов, геоморфологический риск и др.) [7, 11, 13, 14]. Рассмотрены вопросы построения интегрального показателя для оценки потенциальной устойчивости почв к загрязнению тяжелыми металлами с использованием 10 различных индикаторов устойчивости. Интегральные оценки устойчивости почв получены с использованием АСПИД-метода. Вариант оценочного расчета учитывал как критерии аккумуляции тяжелых металлов, так и способность почвы к самоочищению. Предлагаемый подход к оценке устойчивости почв был апробирован на участке ландшафта в пригородной зоне Санкт-Петербурга, в районе нефтедобычи, на острове Сахалин. Пространственный анализ потенциальной устойчивости проводился с использованием географической информационной системы (ГИС). Результаты исследования представлены в материалах международной конференции «Интеркарто/Интергис» разных лет, в том числе и в 2017 г.

Второй пример данного направления − результаты интегральной оценки устойчивости растительного покрова к аэротехногенному загрязнению ландшафта. Для этого была разработана модель-классификация интегральной оценки устойчивости растительности как подсистемы ландшафта к загрязнению атмосферы. В основу модельной классификации были положены первичные результаты работы НИИ охраны атмосферного воздуха по разработке экологических нормативов и опыт, полученный на первом этапе построения интегральных классификационных индексов. Было выделено шесть категорий устойчивости ландшафтной растительности. Наиболее низкая категория устойчивости – крайне неустойчивая – соответствует группе самых чувствительных растительных организмов – лишайников. К неустойчивым с величиной индекса 0,14−0,206 отнесены хвойные леса, поскольку они очень чувствительны к воздействию большинства атмосферных загрязнителей. Для лиственных лесов с малоустойчивой категорией характерны более высокие значения оценочных индексов (0,206−0,425). Относительно устойчивой к загрязнению атмосферного воздуха является растительность сельскохозяйственных ландшафтов. Ландшафты, где преобладает травяная растительность, характеризуются как устойчивые к загрязнению воздуха (0,522−0,775). Растительность техногенных экотопов отнесена к высокоустойчивым сообществам (0,775−1,0). В качестве тестируемой территории была выбрана южно-таежная подзона Республики Коми. В качестве базовой оценочной основы использовалась карта растительности Республики Коми (http://abratsev.ru/gisssu/). Контуры растительности были привязаны к границам южно-таежной подзоны. Всего было выделено 135 площадных объектов оценки. Соотнесение классификационных индексов с типом растительности и использование методики синтетического картографирования позволили построить пилотный проект карты интегральной оценки устойчивости растительности ландшафтов. Эти же данные использовались для оценки устойчивости растительности к загрязнению атмосферного воздуха.

Оценка устойчивости социо-эколого-экономических систем (СЭЭС), оценка качества жизни населения и выявление его трансформаций при внешнем воздействии на отдельные подсистемы (экологическая, экономическая, социальная). В соответствии с имеющимися в литературе данными и обобщением опыта исполнителей, представленным на международных конференциях в Албене (Болгария) в 2016 и 2017 гг. и в других публикациях, были предложены параметры и модели оценки состояния социо-эколого-экономических систем (СЭЭС) и качества жизни населения (КЖН). Для исследования устойчивости были спланированы следующие сценарии воздействия на СЭЭС региона: 1 − гипотетическое ухудшение экологической ситуации в регионе на 30 %; 2 − гипотетическое ухудшение экономической ситуации в регионе на 30 %; 3 − гипотетическое ухудшение социальных условий в регионе на 30 %; 4 − гипотетическое ухудшение ситуации во всех блоках одновременно на 30 %. Далее в сценариях 5−8 реализовано двукратное ухудшение ситуации во всех перечисленных блоках поочередно и во всех блоках одновременно. Рассчитаны интегральные показатели качества жизни населения для всех восьми сценариев для первого (внутри блоков) и второго (между блоками) уровней свертки показателей. Основной задачей исследований было выполнение свертки показателей на первом и втором уровнях и выявление ситуаций, при которых СЭЭС не сможет сохранить свои свойства и параметры режимов в отдельных блоках и СЭЭС в целом в пределах классов, в которых она находилась в 2013 г., поскольку все изменения в сценариях реализованы на фоне 2013 г. Для оценки качества жизни населения было отобрано 18 критериев, которые, в свою очередь, образуют три блока: экономический, социальный, экологический. Введены пять классов оценки качества жизни: I класс («высокое»), II класс («выше среднего»), III класс («среднее»), IV класс («ниже среднего»), V класс («низкое»). Близость интегрального (сводного) показателя к 0,0 характеризует улучшение качества жизни населения, близость к 1,0 – снижение качества жизни населения. Разработаны оценочные шкалы для критериев по классам качества.

В 2016 г. предложена модель-классификация оценки качества жизни населения на первом и втором уровнях обобщения данных с учетом равенства весов (приоритетов оценивания). В качестве ключевого района были выбраны регионы АЗР и Тверская область. Состояние СЭЭС сравнивалось для периода с 2003 по 2015 г. В исследовании получено, что самым чувствительным блоком оказался блок социальных условий. Для него отмечено максимальное увеличение эффекта от воздействия как на отдельные подсистемы (блоки), так и в целом на социо-эколого-экономическую систему (сводная оценка). При невысоких негативных изменениях экологические и экономические параметры дают примерно одинаковое изменение как на первом уровне свертки, так и на втором. Заметно, что после 30 %-го ухудшения ситуации на сводную оценку сильнее влияют экономические факторы.

Отмечено, что во всех исследуемых регионах присутствует тенденция к улучшению качества жизни населения. Мурманская область, Республика Коми, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Республика Саха (Якутия) – улучшение качества жизни населения на 7–10 %. Архангельская область, Ненецкий

автономный округ, Чукотский автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ − улучшение качества жизни населения на 10−12 %. Неизменным осталось качество жизни в Таймырском (Долгано-Ненецком) автономном округе в период с 2003 по 2005 г.

Для сравнения качества жизни арктических регионов РФ с регионами центральной части страны и рассмотрено качество жизни населения Тверской области. По величине интегрального показателя последнего уровня свертки качество жизни населения в Тверской области с 2003 по 2013 г. улучшилось на 11 %. В итоге установлено отсутствие разных темпов развития регионов АЗР и центральной части Российской Федерации за исследованный временной период.

Заключение

Многолетний опыт проведения эколого-географических исследований дал обширный материал по интегральной оценке объектов окружающей среды с использованием методики анализа и синтеза показателей при информационном дефиците (АСПИД). АСПИД-методика используется в качестве основы, которая может применяться к очень широкому спектру проблем и проектов эколого-географического (геоэкологического) анализа, в частности, при решении прикладных задач в рамках инженерно-экологических изысканий и фундаментальных исследований. На основе полученных интегральных оценок, на базе ГИС проведен анализ и районирование акваторий и территорий.

Исследования выполнялись при поддержке грантом РФФИ 16-05-00715-а.

Литература

1. *Многокритериальная* оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. V. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды урбанизированных территорий / Л.В. Александрова, В.Ю. Васильев, В.В. Дмитриев // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 2000. Вып. 4, № 31. – С. 34–47.
2. *Алферова Т.В., Третьякова Е.А.* Концептуальное моделирование определения категории «устойчивое развитие» // Журнал экономич. теории. 2012, № 4. – С. 46–52.
3. *Васильев В.Ю., Огурцов А.Н., Хованов Н.В.* Организация специализированных приложений для ГИС на принципах АСПИД-методологии // Устойчивое развитие территорий: геоинформационное обеспечение и практический опыт // Материалы междунар. конф. «Интеркарто 10». – Владивосток (Россия) – Чаньчунь (КНР), 2004. – С. 134–143.
4. *Оценка* состояния и устойчивости экосистем / В.В. Снакин, В.Е. Мельченко, Р.О. Бутовский и др. – М.: ВНИИприрода, 1992. – 127 с.
5. *Дмитриев В.В., Огурцов А.Н.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. I. Интегральная оценка устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2012, № 3. – С. 65–78.
6. *Дмитриев В.В., Огурцов А.Н.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. II. Методы интегральной оценки устойчивости наземных и водных геосистем // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2013, № 3. – С. 88–103.
7. *Дмитриев В.В., Огурцов А.Н.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. III. Интегральная оценка устойчивости почвы и наземных геосистем // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2014, № 4. – С. 114–130.

8. *Многокритериальная* оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. IV. Токсическое загрязнение воды и грунтов / В.В. Дмитриев, А.Н. Огурцов, В.Ю. Васильев, В.Ю. Третьяков // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 1999. Вып. 1. – С. 40–53.
9. *Дмитриев В.В., Федорова И.В., Бирюкова А.С.* Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Ч. IV. Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных геосистем // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2016, № 2. – С. 37–53.
10. *Корчагина Е.В.* Анализ и оценка устойчивого развития социо-эколого-экономических систем. Специальность 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством (региональная экономика): автореф. дисс. … д-ра экон. наук. – Гатчина, 2012. – 377 с.
11. *Интегральная* оценка и пространственный анализ потенциальной устойчивости почвенного покрова Большеземельской тундры к загрязнению нефтяными углеводородами / Ю.Л. Машкин, С.В. Орлов, В.Ю. Разживин, А.Н. Огурцов // Инженерные изыскания. 2013, № 13. – С. 60–67.
12. *Московченко Д.В.* Картографирование устойчивости ландшафтов севера Западной Сибири к химическому загрязнению // География и природные ресурсы. 1994, № 3. – С. 129–138.
13. *Геоинформационный* анализ и синтез показателей устойчивости почвенного покрова к загрязнению нефтяными углеводородами при информационном дефиците / А.Н. Огурцов, В.Ю. Разживин, Г.Б. Пигольцина, Н.В. Хованов // ИнтерКарто – ИнтерГИС 13: устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт // Материалы Международной конференции Ханты-Мансийск–Йеллоунайф, 12–24 августа 2007 г. – Ханты-Мансийск: Изд-во «Полиграфист», 2007. Т. 1. – С. 189–196.
14. *Огурцов А.Н., Бахматова К.А.* Интегральная оценка и пространственный анализ потенциальной устойчивости почвенного покрова урбанизированной территории к загрязнению тяжелыми металлами // Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2016;2(22):232-243. DOI:10.24057/2414-9179-2016-2-22-232-243.
15. *Огурцов А.Н., Хованов Н.В.* Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. III. Оценка степени благоприятности природных условий макрорегионов северо-запада РФ для жизни людей // Вестник С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. 1997. Вып. 2. – С. 55–62.
16. *Розенберг Г.С.* Модели в фитоценологии. – М.: Наука, 1984. – 265 с.
17. *Тигеев А.А* Оценка устойчивости ландшафтных комплексов при крупномасштабном картографировании // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2006, № 6. – С. 164–169.
18. *Третьякова В.Е.* Оценка устойчивости развития эколого-экономических систем: динамический метод // Проблемы прогнозирования. 2014, № 4. – С. 143–154.
19. *Хованов Н.В.* Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. – 204 с.

УДК [502.173:556]:51-7

С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОСНОВА ПЛАНИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ФГБУН «Институт озероведения Российской академии наук» (ИНОЗ РАН)

S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova

MATHEMATICAL MODELING AS A BASIS FOR PLANNING SUSTAINABLE USE OF WATER RESOURCES

Представлена детерминировано-стохастическая моделирующая система, включающая в себя модели генерации рядов метеоэлементов, формирования стока на водосборе, биогенной нагрузки на водные объекты, годового твердого стока притоков, а также гидродинамики водоема. Результаты расчетов представляются в виде параметров распределения среднемесячных и среднегодовых слоев стока, годовой биогенной нагрузки на водный объект, годового твердого стока, а также в виде оценки интенсивности заиления водоема речными наносами при различных гидрометеорологических ситуациях.

Ключевые слова: *детерминировано-стохастическое моделирование, биогенная нагрузка, сток, заиление, речные наносы, водохранилище.*

In the article a deterministic-stochastic modeling system is presented. It includes models for generation of meteorological series, runoff in the catchment, nutrient load on water bodies, annual solid flow in tributaries, and hydrodynamics of the water body. The results of the calculations are presented in the form of parameters for the distribution of the average monthly and annual runoff, the annual nutrient load on the water body, the annual solid runoff, and also it is presented as silting intensity of the reservoir by river sediments under various hydrometeorological conditions.

Keywords: *deterministic-stochastic modeling, nutrient load, runoff, silting, river sediments, reservoir.*

Проблемы планирования рационального использования водных ресурсов, вызванные избыточной антропогенной нагрузкой с высокой степенью неоднородности во времени и пространстве, определяют необходимость совершенствования системы мониторинга, методов диагностики и анализа переменных состояния различных природных комплексов. Однако нередко относительно непродолжительные ряды наблюдений не позволяют с достаточной достоверностью как оценить текущее состояние водных объектов и их водосборов, так и проанализировать тенденции изменения их качественных и количественных показателей.

При решении широкого круга прикладных задач, связанных с оценкой и прогнозом стока, выноса взвешенных и растворенных примесей с водосборов, а также с формированием нагрузки на водные объекты, возникает потребность расчета не только средних значений искомых характеристик, но и диапазонов их возможных изменений. Одним из возможных способов решения такого рода задач является использование детерминировано-стохастических (ДС) моделей, включающих

в себя блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов в качестве входа в последующие детерминированные блоки модели, описывающие сток и вынос примесей с водосбора. Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы ДС моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных значений метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стоковые ряды и тем более ряды измеренных значений выноса примесей с водосбора. Создание такого модельного комплекса полностью отвечает основной задаче прикладной экологии, которая определяется «разработкой принципов рационального использования природных ресурсов на основе сформулированных общих закономерностей организации жизни» [7, с. 320].

В Институте озероведения разработана и практически реализована ДС моделирующая система «погода – сток – биогенная нагрузка – речные наносы – заиление», основанная на комплексе математических моделей генерации рядов метеоэлементов, формирования стока на водосборе, биогенной нагрузки на водные объекты, годового твердого стока притоков, гидродинамики водоема. Первоначальным входом в ДС моделирующую систему являются ряды наблюдений за метеорологическими элементами. Результаты расчетов представляются в виде параметров распределения среднемесячных и среднегодовых слоев стока, годовой биогенной нагрузки на водный объект, годового твердого стока, а также в виде оценки интенсивности заиления водоема речными наносами при различных гидрометеорологических ситуациях. Ниже приведена схема ДС моделирующей системы (рис. 1) и краткое описание моделей, составляющих эту систему.

Стохастическая модель погоды – СМП (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614228 от 09.04.2015 г.) создана под руководством Ю.Б. Виноградова [1, с. 280] и практически реализована в работе [8, с. 7]. Модель разработана в целях обеспечения поступления на вход моделей формирования стока рядов метеорологической информации требуемой продолжительности. Модель состоит из двух основных блоков – оценки параметров СМП и имитационного моделирования суточных рядов метеорологических величин (температуры воздуха, слоев осадков, дефицита влажности воздуха и продолжительности выпадения осадков). Позволяет генерировать ряды метеоэлементов как для современных условий, так и по заданным прогнозным изменениям их средних значений.

Модель формирования стока с водосбора ILHM – Institute of Limnology Hydrological Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015 г.) разработана в Институте озероведения РАН [3, с. 76] 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 формирования биогенной нагрузки на водосборе ILLM – Institute of Limnology Load Model (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612519 от 27.02.2014 г.) разработана в Институте озероведения РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса биогенных

Рис. 1. Схема ДС моделирующей системы
«погода – сток – биогенная нагрузка – речные наносы – заиление»

веществ с водосборных территорий [3, с. 78], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [11, с. 50]. Модель предназначена для решения задач, связанных с количественной оценкой нагрузки общим фосфором и общим азотом, сформированной различными источниками загрязнения, и прогнозом ее изменения под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений.

Модель годового твердого стока рек (Свидетельство о государственной регистрации № 2014612518 от 27.02.2014 г.) разработана в Институте озероведения РАН и предназначена для оценки годового твердого стока при недостаточности данных гидрометрических наблюдений за расходами воды и наносов [9, с. 48]. В модели реализовано имитационное моделирование суточных расходов наносов, их пересчет в общий расход наносов и последующая оценка параметров распределения годового твердого стока.

Модель гидродинамики и транспорта наносов в водоеме [10, с. 61] основана на совместном решении уравнений «мелкой воды» в двумерной постановке и аналитической формулы расхода наносов [9, с. 39]. Модель позволяет вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища как в среднем за год, так и с учетом пространственной и временно́й изменчивости происходящих процессов. Позволяет оценивать изменения течений и заиления водоема при реализации различных прогнозных сценариев, в том числе и сгенерированных с помощью СМП.

ДС моделирование обычно проводится в определенной последовательности:

1. Оценка статистических параметров наблюденных рядов метеорологических элементов (среднесуточная температура воздуха, суточные слои осадков).
2. Генерирование рядов метеорологических элементов заданной продолжительной длины с пересчетом суточных значений метеорологических элементов в среднемесячные значения.
3. Моделирование месячных (годовых) слоев стока по гидрологической модели, прошедшей верификацию в изучаемом регионе.
4. Моделирование годовых значений нагрузки по модели биогенной нагрузки, прошедшей верификацию в изучаемом регионе.
5. Моделирование годового твердого стока рек.
6. Оценка параметров распределения значений стока, биогенной нагрузки и твердого стока рек (среднего значения, среднего квадратичного отклонения и значений различной обеспеченности превышения).
7. Моделирование гидродинамики и переноса примеси в водоеме.
8. Оценка интенсивности заиления водоема речными наносами с учетом неоднородности во времени и в пространстве.

В настоящее время разработанная моделирующая система используется для решения следующих задач:

• Оценка основных гидрологических характеристик водной системы «водосбор – водоем», биогенной нагрузки и годового твердого стока в современных условиях при недостаточности данных наблюдений. Здесь СМП является генератором метеоэлементов для современных условий, на основании которых выполняются расчеты функций распределения стока воды, взвешенных и растворенных примесей, которые невозможно построить на основе существующих данных мониторинга.

• Расчет изменения указанных характеристик при реализации различного рода прогнозных сценариев. Эти сценарии могут выражать изменение условий антропогенных и климатических воздействий на систему «водосбор – водоем». СМП является генератором метеоэлементов при измененных их прогнозных значениях.

Ниже приведены примеры использования моделирующей системы в обоих перечисленных направлениях ДС моделирования.

Моделирование при отсутствии или недостаточности данных наблюдений

Биогенная нагрузка на Онежское озеро [5, с. 53]. При выполнении расчетов по модели оценка параметров СМП проводилась на основании данных наблюдений за метеорологическими элементами на метеостанциях Сортавала, Петрозаводск и Вытегра за период 1950–2013 гг. Согласно полученным параметрам СМП сгенерированы ряды суточных значений метеорологических элементов – температуры воздуха и слоев осадков – продолжительностью 500 лет. По гидрологической модели рассчитаны слои месячных и годовых слоев по реальным и сгенерированным рядам метеорологических элементов, а также годовые значения нагрузки общим фосфором и общим азотом со стороны водосбора. На рис. 2 приведены кривые распределения годовых слоев стока для водосбора Онежского озера, рассчитанных по реальной и сгенерированной метеорологии.

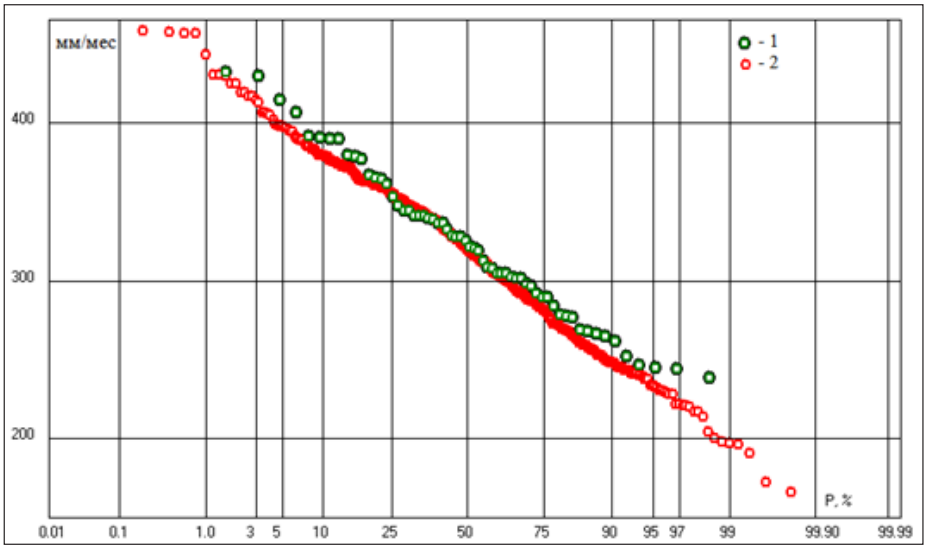

Рис. 2. Распределение рассчитанных по реальной (1)
и сгенерированной метеорологии (2) годовых слоев стока для Онежского озера

В табл. 1 представлено сравнение результатов расчета биогенной нагрузки 50 %-й обеспеченности на основе ДС моделирования и по натурным данным, осредненным за период наблюдений (2007–2014 гг.) [5, с. 53].

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования с данными натурных наблюдений

Диффузная нагрузка, сформированная на водосборе, т/год	$P_{общ}$	$N_{общ}$
Рассчитанная по ДС моделирующей системе	669	11 981
Рассчитанная по данным наблюдений ИВП Севера КарНЦ РАН	645	12 029

Биогенная нагрузка на Финский залив с частного водосбора [6, с. 367]. 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 основании полученных параметров СМП сгенерированы ряды суточных значений метеорологических элементов – температуры воздуха и слоев осадков – продолжительностью 100 лет. В 2013 г. на 17 малых притоках залива, расположенных на изучаемой территории и занимающих площадь ~4300 км^2, проведена серия натурных измерений и рассчитан вынос фосфора с водосборов этих рек. На основе полученных данных проведена калибровка модели ILLM, после чего расчеты выполнялись уже для всей площади частного водосбора Финского залива. Результаты ДС моделирования стока, фосфорной нагрузки и ее природной (фоновой) составляющей (табл. 2) показали, что в настоящее время среднее значение фосфорной нагрузки на залив с его частного водосбора составляет 285 т/год (без учета точечных сбросов), ее природная

составляющая – 84,2 т/год при среднем квадратичном отклонении соответственно 25,1 и 13,3 т/год.

Таблица 2

Средние значения ($X_{ср}$), средние квадратичные отклонения (s) и значения различной обеспеченности ($X_{\%}$) стока и фосфорной нагрузки на Финский залив с российского частного водосбора

	$X_{ср}$	s	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
Сток, мм/год	304	57,5	438	399	343	265	209	170
Нагрузка, т Р/год	285	25,1	343	326	302	268	244	227
Природная составляющая нагрузки, т Р/год	84,2	13,2	115	106	93	75	62	53

Оценка последствий климатических изменений

Для оценки возможных изменений стока в будущем использовался детерминированный сценарий климатических изменений, разработанный для восточной части Балтийского региона [2, с. 34]. В параметры СМП внесены соответствующие изменения и сгенерированы ряды прогнозных значений среднесуточной температуры воздуха и суточных слоев осадков продолжительностью 100 лет для условий 2100 г. Сгенерированные прогнозные ряды метеорологических элементов поступили на вход в модель формирования стока. Результатом расчетов явились прогнозные среднемесячные значения расходов воды.

Формирование стока с водосбора Ладожского озера и р. Невы [4, с. 24]. Оценка параметров СМП проведена по данным наблюдений трех метеостанций, расположенных на территории водосбора р. Невы и Ладожского озера, – Сортавала, Петрозаводск и Тихвин – для периода с 1970 по 2010 г.

Значения рассчитанных и наблюденных среднегодовых значений осадков, испарения и слоя стока для водосбора Ладожского озера и реки Невы в створе д. Новосаратовка для условий 2100 г. приведены в табл. 3. На рис. 3 представлены рассчитанные кривые распределения годовых слоев стока в современных условиях и в конце XIX в.

Таблица 3

Наблюденные и рассчитанные по ДС модели значения элементов водного баланса бассейна р. Невы и Ладожского озера в створе д. Новосаратовка

Элементы водного баланса	Наблюденные	Рассчитанные с использованием реальной метеорологии	Рассчитанные для условий 2100 г.
Осадки, мм/год	654	654	758
Испарение, мм/год		386	504
Сток, мм/год	271	269	254

Рассчитанные средние значения годового стока составили 271 мм/год для 2010 г. и 254 мм/год для 2100 г. То есть согласно использованному климатическому сценарию, несмотря на существенное увеличение слоя осадков, следует ожидать снижение стока с водосбора Ладожского озера и р. Невы ориентировочно на 6,3 % по отношению к современному периоду. Возможной причиной явится увеличение испарения за счет потепления, которое компенсирует возрастание осадков.

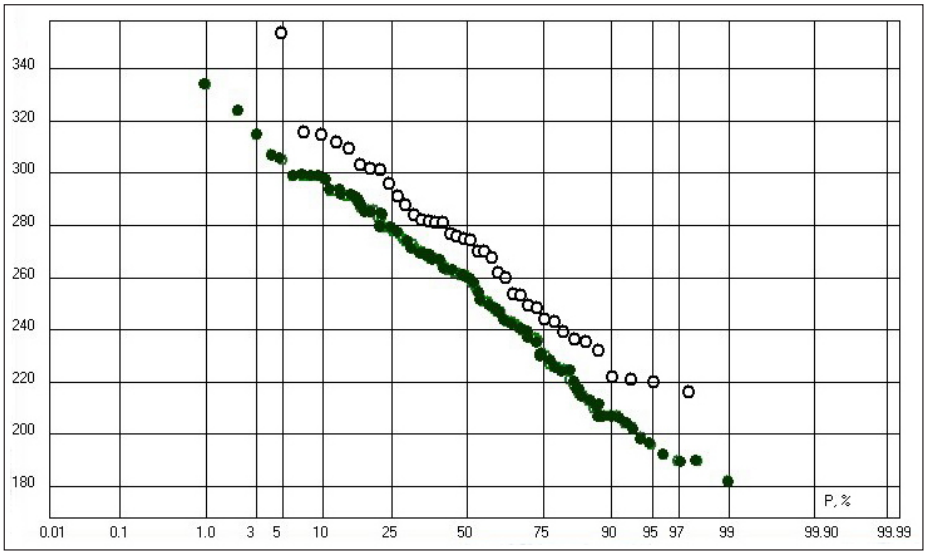

Рис. 3. Кривые распределения наблюденных (○) и рассчитанных (●) прогнозных годовых слоев стока для р. Невы – д. Новосаратовка

Формирование стока и биогенной нагрузки на водохранилище Сестрорецкий Разлив. Заиление речными наносами. Оценка параметров СМП проводилась на основании данных наблюдений за метеорологическими элементами, осредненными по двум метеостанциям – г. Выборг и г. Санкт-Петербург – за период 1970–2010 гг.

Рассчитанные средние значения годового стока (табл. 4) составили 374 мм/год (4,95 м^3/с) за период 2000–2014 гг. и 428 мм/год для 2100 г. То есть согласно использованному климатическому сценарию существенное увеличение слоя осадков приведет к возрастанию стока с водосбора Сестрорецкого Разлива на 14 % по отношению к современному периоду. Природная (фоновая) фосфорная нагрузка на водоем со стороны водосбора повысится на 7 % и составит 13,64 т/год.

Таблица 4

Средние значения ($X_{ср}$), средние квадратичные отклонения (s) и значения различной обеспеченности ($X_{\%}$) стока и фосфорной нагрузки на Сестрорецкий Разлив с российского частного водосбора

	$X_{ср}$	s	$X_{1\%}$	$X_{5\%}$	$X_{25\%}$	$X_{75\%}$	$X_{95\%}$	$X_{99\%}$
Настоящее время								
Сток, мм/год	392	50,61	510	476	426	358	308	274
Нагрузка, т Р/год	15,65	1,68	19,56	18,42	16,78	14,52	12,88	11,74
Природная нагрузка, т Р/год	12,7	1,31	15,75	14,86	13,58	11,82	10,54	9,65
Прогноз								
Сток, мм/год	428	48,84	542	509	461	395	347	314
Нагрузка, т Р/год	16,86	1,63	20,66	19,55	17,95	15,77	14,17	13,06
Природная нагрузка, т Р/год	13,64	1,26	16,58	15,72	14,48	12,80	11,56	10,70

Прогнозные значения годового твердого стока $R_{ср.прогноз}$ р. Сестры составили 2811 т/год, р. Черной – 1261 т/год, что почти на 15 % превышает наблюденный годовой твердый сток $R_{ср. набл}$ (табл. 5). Учитывая продолжительный период заиления Сестрорецкого Разлива именно речными наносами, такое увеличение годового твердого стока незначительно скажется на интенсивности заиления водохранилища речными наносами.

Таблица 5

Прогнозная скорость заиления
речными наносами Сестрорецкого Разлива δ, мм/год

$R_{ср. набл}$, т/год	$R_{ср.прогноз}$, т/год	$\delta_{набл.}$, мм/год	$\delta_{прогноз}$, мм/год
3500	4072	0,1	0,12

Результаты расчетов по модели гидродинамики и транспорта наносов показали, что увеличение стока на 14 % приведет к увеличению скоростей течений и, как следствие, к расширению области циркуляции речных наносов в акватории. Как в межень, так и в половодье более насыщенными наносами оказываются северная и центральная части водохранилища, частично наносы достигают и южной части Сестрорецкого Разлива.

Выводы. Построена и практически реализована детерминировано-стохастическая моделирующая система, основанная на комплексе математических моделей генерации рядов метеорологических элементов, формирования стока на водосборе, биогенной нагрузки на водные объекты, твердого стока притоков, гидродинамики и переноса примесей в водоеме. Выполненные с использованием системы расчеты показывают, что ДС моделирование – это эффективный инструмент оценки параметров распределения стока, транспорта речных наносов, выноса химических веществ с водосборов, интенсивности заиления водохранилищ речными наносами в условиях ограниченности данных натурных наблюдений. Таким образом, удовлетворяется запрос прикладных инженерных задач рационального водопользования, заключающийся в потребности расчета не только средних значений искомых характеристик, но и диапазонов их возможных изменений, включающих реакцию на экстремальные гидрометеорологические воздействия.

Перспективным направлением использования разработанной модельной системы являются прогностические оценки последствий антропогенных и климатических воздействий на характеристики системы «водосбор – водоем». Дальнейшее теоретическое развитие ДС моделирования в области планирования рационального использования водных ресурсов состоит прежде всего в совершенствовании методов детерминированного описания процессов в системе «водосбор – водоем» и в значительной степени зависит от существенной перестройки и совершенствования системы мониторинга водных объектов, а также проведения специальных натурных исследований в целях уточнения структуры модели и ее параметров. Практическое использование ДС моделей связано с возможностью планирования хозяйственной деятельности на водосборе в соответствии с экстремальными условиями водности, а также при отсутствии или недостатке данных гидрометрических наблюдений.

Литература

1. *Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 312 с.
2. *Изменения* температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI / Г.С. Голицын, Л.К. Ефимова, И.И. Мохов и др. // Изв. РГО. 2002. Т. 134, вып. 6. – С. 34–45.
3. *Кондратьев С.А.* Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. − СПб.: Наука, 2007. – 255 с.
4. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование стока реки Невы в условиях возможного изменения климата // Учен. зап. РГГМУ. 2016, № 42. – С. 24–32.
5. *Биогенная* нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова, Е.Г. Маркова и др. // Изв. Русск. геогр. общ-ва. 2016, № 5. – С. 53–64.
6. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Детерминированно-стохастическое моделирование как инструмент оценки стока и выноса биогенных веществ с водосборов при недостатке данных натурных наблюдений // Соврем. проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхн. вод. Мат-лы научн. конф. с междунар. участием. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. ФГБУ «Гидрохимический институт», 2015. – С. 367–371.
7. *Уваров С.А.* Принципы экологического обеспечения логистики: материалы 10-й Международной научно-практической конференции «Логистика – евразийский мост» (14–16 мая 2015 г., Красноярск). – Красноярск: Краснояр. гос. аграрн. ун-т, 2015. – С. 320–325.
8. *Шмакова М.В.* Стохастическая модель погоды в системе детерминировано-стохастического моделирования характеристик стока: автореф. дис. … канд. техн. наук. – СПб., 2000. – 25 с.
9. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. – СПб.: Лема, 2013. – 142 с.
10. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А., Маркова Е.Г.* Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) // Учен. зап. РГГМУ. 2016, № 44. – С. 61–69.
11. *HELCOM* Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 2007. – 103 p.

УДК [556.55.012:502.175](282.247.212)

В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин, И.В. Токарев

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОД ПРИТОКОВ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНЫХ ИНДИКАТОРОВ

ФГБУН «Институт озероведения Российской академии наук» (ИНОЗ РАН), v.n.rybakin@gmail.com

V.A. Rumyantsev, V.N. Rybakin, I.V. Tokarev

DISTRIBUTION OF WATERS OF INFLOWS AND UNDERGROUND WATERS IN LAKE LADOGA ACCORDING TO ISOTOPE INDICATORS

Данная статья посвящена изучению условий формирования баланса и динамики водных масс бассейна и акватории Ладожского озера с помощью стабильных изотопных трассеров – дейтерия (δ^2H) и кислорода-18 ($\delta^{18}O$). Показано, что данные о δ^2H и $\delta^{18}O$ однозначно диагностируют потери воды на испарение, которые составляют в среднем около 18 %. В водной толще северной ванны фиксируется аномалия облегчения состава кислорода, происхождение которой авторы связывают с субаквальной разгрузкой подземных вод из рифейских отложений. Полученные результаты доказывают перспективность внесения изотопного опробования в состав исследовательских работ в бассейне Ладожского озера. Наличие индивидуальных особенностей в пространственном и временном распределении содержаний дейтерия и кислорода-18 в притоках, озере и подземных водах позволяет обоснованно предполагать, что эти данные могут быть использованы при построении математических моделей соответствующих водных объектов.

***Ключевые слова**: стабильные изотопные трассеры, дейтерий, кислород-18, притоки и водная толща Ладожского озера, испарение, атмосферные осадки, подземные воды.*

This article is devoted to the study of the conditions for the formation of the balance and dynamics of the water masses of the basin and the water area of the Ladoga Lake with the help of stable isotope tracers – deuterium (δ^2H) and oxygen-18 ($\delta^{18}O$). According to the data on δ^2H and $\delta^{18}O$, the effect of evaporation is unambiguously diagnosed, the calculation gives water loss by evaporation, on average, about 18 %. In the water column of the northern bath, an anomaly is established to facilitate the composition of oxygen, the origin of which the authors associate with subaquatic discharge of groundwater from the Riphean sediments. The obtained results prove the prospects of introducing isotope testing into the research work in the basin of the Ladoga Lake. The presence of individual features in the spatial and temporal distribution of the deuterium and oxygen-18 contents in tributaries, the lake and underground waters allows us to reasonably assume that these data can be used in constructing mathematical models of the corresponding water bodies.

***Key words**: stable isotope tracers, deuterium, oxygen-18, tributaries and water body of the Ladoga lake, evaporation, atmospheric precipitations, groundwater.*

Введение

Акватория Ладожского озера составляет около 16,7 тыс. км^2, площадь водосбора – 278 тыс. км^2, объем воды в озере – 838 км^3. Водный баланс озера определяется

осадками, среднемноголетняя величина которых в бассейне озера для периода 1961–1990 гг. составляла около 790 мм/год при расчетной величине испарения около 400 мм/год [3]. Притоками Ладожского озера являются несколько тысяч рек, из которых лишь 97 % имеют длину менее 10 км. Наиболее крупным притоком является р. Свирь, соединяющая Ладогу с Онежским озером. Сток р. Свирь зарегулирован Верхнесвирской ГЭС.

В геологическом отношении южная часть ложа озера расположена в пределах осадочного чехла Восточно-Европейской платформы и соответствующего артезианского бассейна, а северная ванна – на Балтийском щите, сложенном архей-протерозойскими кристаллическими породами. Немного севернее зоны сочленения указанных структур на дно озера выходит силл, образующий на поверхности Валаамский архипелаг. В западной и южной частях озера под донными осадками и вендскими отложениями в депрессии фундамента залегают песчаники рифея, заполняющие Ладожский грабен. В плане грабен выходит за пределы акватории на несколько десятков километров.

Несмотря на длительность изучения бассейна Ладожского озера широким спектром методов в рамках решения практических задач и реализации разнообразных научных проектов ряд вопросов, касающихся количественной оценки параметров, определяющих водный баланс и качество воды, остается не до конца прояснённым. В частности, возникают определенные проблемы с модельным воспроизведением годового хода осадков на Ладожском водосборе [4, 2, 11]. Имеет место довольно большой разброс в значениях испарения, рассчитанных по эмпирическим и модельным данным, причем среднее модельное испарение, как правило, несколько занижено по сравнению с рассчитанным по эмпирическим данным [6]. Есть указания на наличие субаквальной разгрузки подземных вод в озеро [3], однако локализация участков этой разгрузки, оценка ее вклада в формирование вещественного состава и практической значимости пока не выполнены. Обеспечение упомянутых выше моделей количественными параметрами, их верификация и калибровка, особенно с учетом масштабных эффектов, которые следует принимать во внимание при переносе натурных данных в математическую модель, а особенно при ее генерализации, представляют собой значительную трудность.

Известно, что стабильные изотопы – дейтерий (^{2}H) и кислород-18 (^{18}O), входящие в молекулу воды (далее – изотопный состав воды), широко используются как глобальные индикаторы при решении прикладных водохозяйственных задач и для фундаментальных исследований. Эти трассеры позволяют установить генетическую связь поверхностных вод с атмосферными осадками, водотоками и подземными водами, оценивать влияние испарения и темпы водообмена, а также отслеживать химическую трансформацию водных масс, поступающих из притоков в водоемы [12]. На взгляд авторов, использование дейтерия и кислорода-18 в качестве трассеров при изучении Ладожского озера и его водосбора позволит улучшить уровень интерпретации первичных данных, а также разрешить трудности, возникающие при построении математических моделей.

В данной работе рассматриваются первичные результаты исследования водосбора Ладожского озера с помощью дейтерия и кислорода-18, выполненные авторами в 2008–2016 гг. Хотя эти наблюдения не носили регулярного характера,

в силу их относительной новизны, однако ряд полученных на их основе заключений представляется интересным.

Объекты и методы

Акватория. Ладожское озеро имеет димектический характер циркуляции воды, обусловленный температурным режимом водной толщи, осложненный ветровым перемешиванием и движением воды притоков. В холодный период года циркуляция водных масс в озере во многом зависит от ледового покрова, а в весенне-летний период – от характера и пространственного положения термобара.

Исследование воды акватории Ладожского озера выполнялось с борта НИС «Талан» и с катера «Полярник» (совместные работы с ААНИИ) на станциях мониторинга, расположенных в заливах и открытой части водоема (рис. 1 и 2). Рейсы в основном выполнялись в мае–июне и августе–сентябре. На большинстве

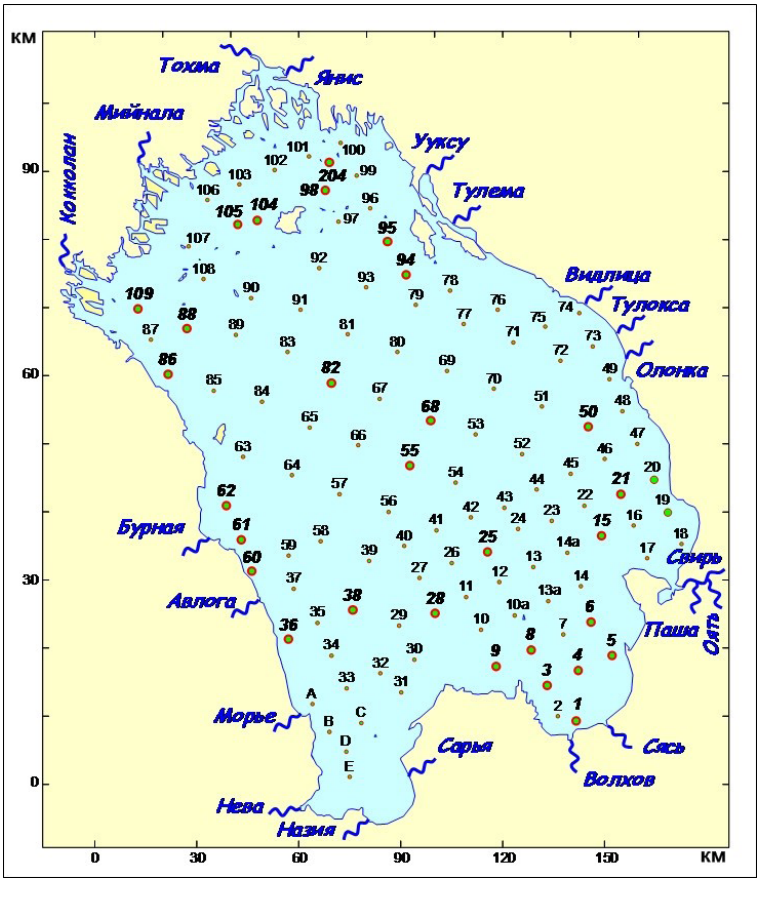

Рис. 1. Схема опробования Ладожского озера и притоков
(точки, в которых выполнялось опробование изотопного состава
воды в акватории, выделены шрифтом и размером значков)

Рис. 2. Отбор проб в северной части акватории Ладожского озера с катера «Полярник», 2016 г.

станций пробы отбирались батометром с двух горизонтов – поверхностного (0,5 м) и придонного слоев. На отдельных станциях выполнялось более детальное опробование водной толщи (до 12 горизонтов).

Опробование притоков. На изотопный состав воды в весеннее-летне-осенний период в 2012–2016 гг. опробовано неоднократно 15 наиболее крупных притоков в нижнем течении или замыкающих створах (см. рис. 1). Ряд относительно мелких притоков опробовались единожды или двукратно.

Подземные воды. Исследованы воды осадочных комплексов и кристаллических пород (в содружестве с Петербургской комплексной геологической экспедицией). Пробы отбирались только из самоизливающих скважин или скважин, оборудованных электрическими насосами, а также восходящих родников. Это несколько сужало круг опробуемых водопунктов, но исключало необходимость прокачки скважин и снижало возможность случайного воздействия антропогенных, сезонных и других мешающих факторов.

Наблюдения за атмосферными осадками. С 2012 г. выполняются регулярные наблюдения за изотопным составом атмосферных осадков на станции Петродворец (территория СПбГУ) и на болотном полигоне Ламмин-Суо (7 км севернее г. Зеленогорск, работы выполнялись в содружестве с Государственным гидрологическим институтом). С 2009 г. наблюдения осуществляются также на станции Петрозаводск (в содружестве с Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, руководитель работ – ст. н. с., к. г.-м. н. Г.С. Бородулина). Отбор проб производится на среднедекадной и средненедельной основе, отдельно опробуются массивные выпадения.

Эксперименты по оценке влияния испарения на изотопный состав воды. В 2015–2016 гг. в различные сезоны выполнено около 50 экспериментов по оценке влияния неравновесного изотопного фракционирования при испарении на содержание дейтерия и кислорода-18 в остаточной воде. Рассчитаны уравнения, аппроксимирующие зависимость: $\delta^{18}O = f(\xi)$ и $\delta^{2}H = f(\xi)$, где ξ – доля испаренной воды.

Метод анализа. Пробы воды для анализа содержания кислорода-18 и дейтерия отбирались в пластиковые герметичные емкости объемом 20–150 мл. В некоторых случаях на месте определялась температура и электропроводность воды, а в лаборатории выполнялся сокращенный химический анализ.

Измерения содержания дейтерия и кислорода-18 в воде производились в основном на лазерном инфракрасном анализаторе изотопного состава воды *Picarro L*-2120-*i* (ресурсный центр «Геомодель», научный парк Санкт-Петербургского государственного университета). В качестве образцов сравнения использованы стандарты МАГАТЭ: *V-SMOW*-2, *GISP* и *SLA*P, а также стандарты Американского геологического общества: *USGS*-45 и *USGS*-46.

В пробах 2008 и 2009 гг. во ВСЕГИНГЕО определялось только содержание кислорода-18 на масс-спектрометре МИ-1201 после уравновешивания воды с углекислым газом. В качестве эталонов использовались внутрилабораторные образцы сравнения, привязанные к стандартам МАГАТЭ.

Неопределенность измерений во всех случаях составляет ±0,1 ‰ по кислороду-18 и ±1 ‰ по дейтерию. Всего проанализировано около 560 проб. Все результаты приводятся в виде $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в промилле относительно состава средней океанической воды (*SMOW*).

Результаты и обсуждение

Атмосферные осадки. В атмосферных осадках наблюдается естественный временной ход изотопного состава, когда зимние осадки характеризуются наименьшими концентрациями дейтерия и кислорода-18, а летние – наибольшими.

В 2012–2016 гг. на станциях Петродворец и Ламмин-Суо наиболее легкий изотопный состав снега составил $\delta^{18}O = –24{,}3$ ‰ и $\delta^{2}H = –183$ ‰, наиболее тяжелый изотопный состав дождя – $\delta^{18}O = –6{,}1$ ‰ и $\delta^{2}H = –32$ ‰. Взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков рассчитан с учетом распределения объема и состава выпадений во времени и составляет $\delta^{18}O = –9{,}7$ ‰ и $\delta^{2}H = –75$ ‰. Локальная линия метеорных вод описывается уравнением $\delta^{2}H = 7{,}86 \cdot \delta^{18}O + 1{,}7$ ($n = 187$, $R^2 = 0{,}98$).

В 2009–2016 гг. для атмосферных осадков на станции Петрозаводск наиболее легкий изотопный состав снега составил $\delta^{18}O = –30{,}9$ ‰ и $\delta^{2}H = –239$ ‰, наиболее тяжелый изотопный состав дождя – $\delta^{18}O = –4{,}1$ ‰ и $\delta^{2}H = –26$ ‰. Взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков составляет $\delta^{18}O = –11{,}7$ ‰ и $\delta^{2}H = –84$ ‰. Локальная линия метеорных вод описывается уравнением $\delta^{2}H = 7{,}66 \cdot \delta^{18}O + 4{,}5$ ($n = 139$, $R^2 = 0{,}97$).

Притоки. В притоках Ладожского озера диапазон вариаций изотопного состава воды, естественно, значительно меньше, чем в осадках, вследствие осреднения стока на индивидуальных водосборах (рис. 3).

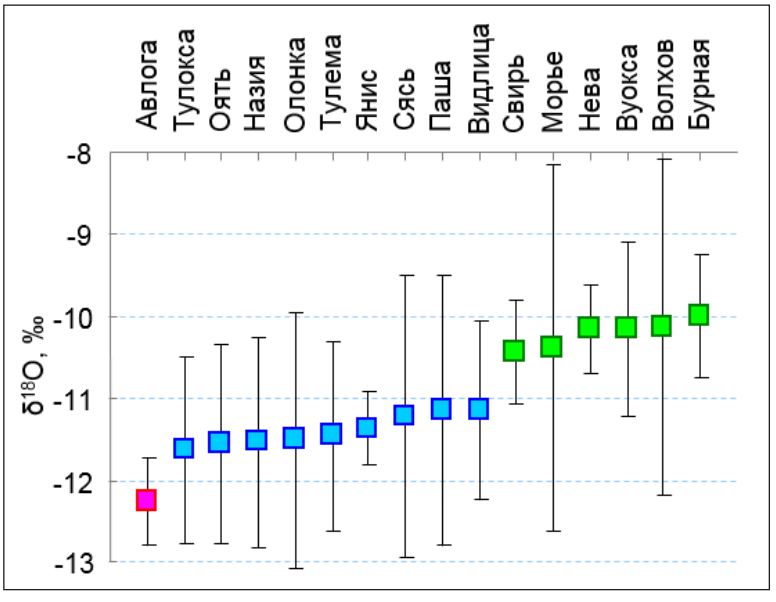

Рис. 3. Изотопный состав кислорода притоков Ладожского озера и р. Невы («усами» показано среднеквадратичное отклонение)

Наблюдается дифференциация состава воды притоков по сезонам (рис. 4). Летом и осенью содержание тяжелых изотопов в речной воде значительно выше, чем зимой, что отражает влияние утяжеления осадков в теплый период года. Зимой изотопный состав воды в реках оказывался существенно легче среднегодового для осадков из-за влияния разгрузки подземных вод, питание которых происходит в значительной степени в период весеннего половодья за счет изотопически легких осадков холодного периода года. В мае, иногда и в начале июня, в речном стоке ощущается вклад изотопически легкой снеготалой воды.

По абсолютным величинам $\delta^{18}O$ все притоки можно разделить на три группы (см. рис. 3):

1) Авлога – река с наиболее изотопически легкой водой и узким диапазоном вариаций изотопного состава кислорода во времени;

2) Тулокса, Оять, Назия, Олонка, Тулема, Сясь, Паша, Видлица – реки со средней по изотопному составу кислорода водой и несколько различающимся размахом сезонных вариаций;

3) Свирь, Морье, Вуокса и Бурная, Волхов – реки с наиболее изотопически тяжелой водой, со значительно различающимся размахом сезонных вариаций.

Обнаруженное устойчивое различие притоков по изотопному составу кислорода отражает в первую очередь особенности питания.

В частности, Авлога с $\delta^{18}O = -12{,}2(\pm 1{,}07)$ ‰, по-видимому, является базисом разгрузки регионального потока подземных вод в восточной части Карельского перешейка и, соответственно, имеет незначительную долю атмосферного питания. В пользу этого свидетельствует то обстоятельство, что соседняя, несколько

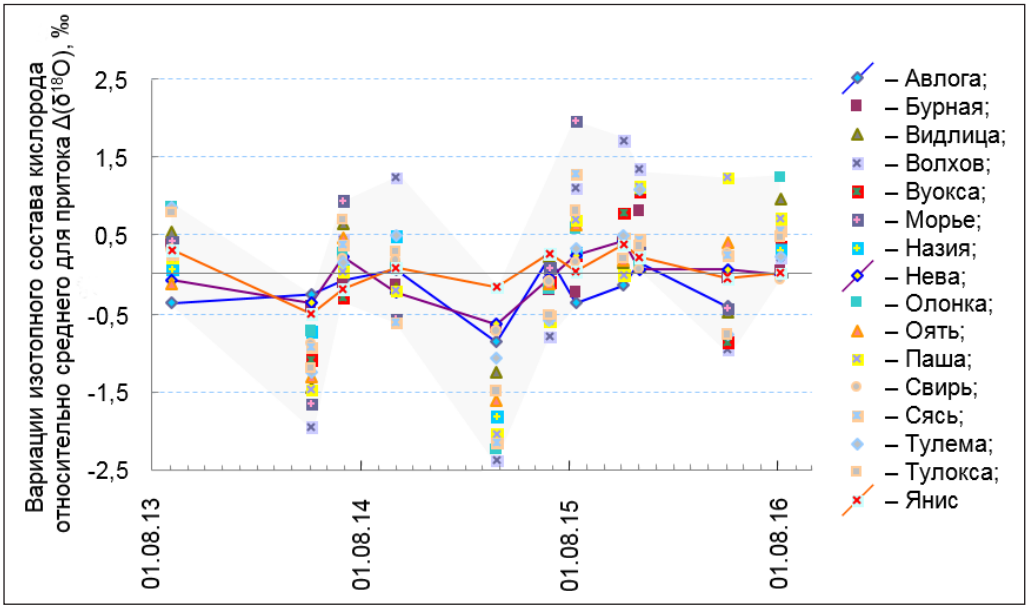

Рис. 4. Вариации изотопного состава кислорода притоков Ладожского озера и р. Невы во времени

южнее расположенная р. Морье (рис. 1) с аналогичными характеристиками водосбора несет существенно более тяжелый средний состав кислорода и отличается относительно большим размахом его вариаций $\delta^{18}O = -10,4$ (±4,45) ‰. Подземные воды, разгружающиеся в р. Авлогу, должны иметь относительно легкий, даже для подземных вод Карельского перешейка, изотопный состав и, вероятнее всего, отличаются значительным возрастом [1].

В качестве подтверждения возможности разгрузки регионального потока на этом участке водосбора приведем данные по скважине глубиной 250 м, расположенной несколько севернее р. Авлоги в пос. Луговое в районе южной оконечности озера Суходольского [10]. Скважина с открытым стволом опробовалась с помощью поинтервальных выпусков по мере углубления ходками по 50 м. В рифейском комплексе были вскрыты воды с напором 7 м над поверхностью земли (абсолютная отметка +18 м), что превышает отметку уреза воды в расположенном в 900 м к северу озере Суходольском (+6 м). При последовательном вскрытии разреза произошло постепенное увеличение дебита выпуска с 500 м^3/сут до более чем 1000 м^3/сут. Минерализация воды в вендском комплексе (верх разреза) составляла около 140 мг/л, а после вскрытия рифейских отложений достигла 640 мг/л. Произошла смена состава подземных вод с HCO_3–Ca–Mg на Cl–HCO_3–Na и заметно изменилось содержание некоторых микроэлементов. Изотопный состав кислорода облегчился от $\delta^{18}O = -13,4$ ‰ в вендском комплексе до $\delta^{18}O = -16,6$ ‰ при выпуске из вендского и рифейского комплексов одновременно.

Похоже, что малые неозерные реки (Янис) северного Приладожья также могут иметь преимущественное подземное питание в течение всего года, о чем

свидетельствуют легкий изотопный состав воды в летний период – $\delta^{18}O = -11{,}4$ ‰ и $\delta^{2}H = -83$ ‰ (в среднем) – и малые вариации изотопного состава за период наблюдений. Однако в бассейне р. Янис, по-видимому, отсутствуют подземные воды с большим возрастом и, соответственно, легким изотопным составом. Последнее связано с тем, что бассейн р. Янис располагается уже в пределах Балтийского гидрогеологического массива, в то время как бассейн р. Авлоги – на северной границе платформы.

Вторая группа рек с $\delta^{18}O = -11{,}6\ldots-11{,}2$ ‰ – с несколько более тяжелым изотопным составом кислорода, чем в р. Авлоге, по-видимому, имеет примерно одинаковый вклад подземного и атмосферного питания. В силу этого они характеризуются несколько более легким изотопным составом по сравнению со взвешенным среднегодовым составом атмосферных осадков, относительно небольшой и примерно одинаковый размах содержания кислорода-18.

Третья группа рек отличается наиболее тяжелым изотопным составом $\delta^{18}O = -10{,}4\ldots-10{,}0$ ‰, приближающимся к взвешенному среднегодовому составу осадков, и, как правило, имеет значительный сезонный разброс величины $\delta^{18}O$, что указывает на преимущественно атмосферное питание.

В пределах водосборов происходит перемешивание осадков различных сезонов, о чем свидетельствует постепенное уменьшение размаха вариаций $\delta^{18}O$ в году (рис. 5). При этом всплеск вариативности параметра $\delta^{18}O$ в конце июля и начале августа соответствует годовому пику атмосферных осадков.

Для крупных рек зависимость изотопного состава воды от сезона года менее выражена, чем для малых водотоков. Для р. Свирь изменчивость параметра $\delta^{18}O$ –

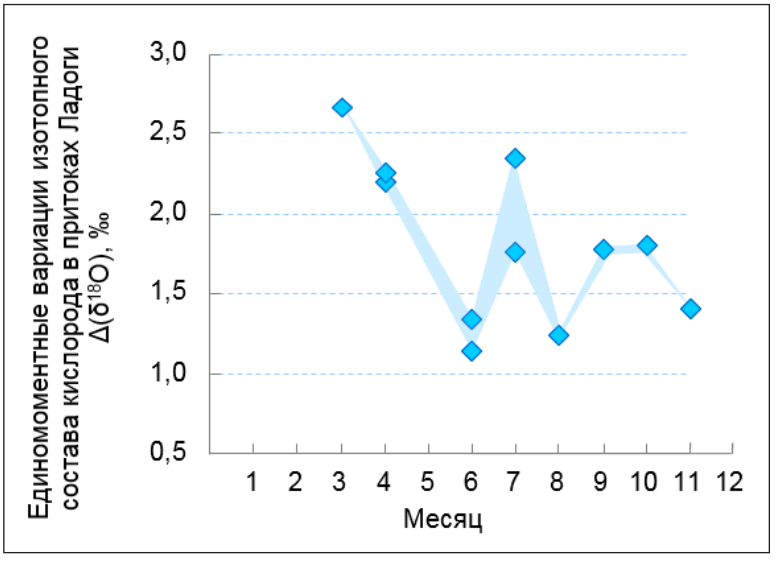

Рис. 5. Средний размах единомоментных вариаций изотопного состава кислорода относительно среднемноголетнего для притоков Ладоги в различные периоды года за 2012–2016 гг.

одна из самых небольших в силу осреднения ее стока Онежским озером, среднее время пребывания воды в котором составляет около 16 лет [5]. Аналогично невысока изменчивость и изотопного состава кислорода в воде р. Невы. Вероятнее всего, межгодовое перераспределение стока может происходить также на крупных водосборах, а не только в Ладожском и Онежском озерах. Интересно, что среди крупных рек изотопный состав меняется наиболее значительно в р. Волхов, указывая на наибольшую долю атмосферного питания на его водосборе. На этом фоне незначительные вариации параметра $\delta^{18}O$ в малых реках Авлога, Янис и Бурная особенно заметны.

Приведенные выше соображения насчет условий питания притоков Ладоги, полученные на основании анализа изотопного состава их воды, в целом согласуются с многолетними гидрологическими наблюдениями [8, 9]. Исключение составляет р. Авлога, для которой значимость подземного питания не оценивалась напрямую, а в качестве реки-аналога была выбрана р. Морье, что является ошибкой.

Для многих притоков летом отмечается влияние испарения на водосборах (на диаграмме δ^2H vs. $\delta^{18}O$ точки смещены вправо от ЛЛМВ). Для крупных рек смещение изотопных составов за счет испарения отмечается не только в летнем, но и в зимнем стоках, что также указывает на межгодовое перераспределение стока на их водосборах. Расчет потерь на испарение производился на основании экспериментальных зависимостей изотопного состава остаточной воды от доли испарившейся. Расчетная доля потерь воды на испарение с речных водосборов летом достигает 23 %.

Ладожское озеро. Изотопный состав воды в Ладожском озере в целом относительно стабилен – $\delta^{18}O = -11{,}7 ... -9{,}5$ ‰ (в среднем $\delta^{18}O = -10{,}6$ ‰), $\delta^2H = -84 ... -74$ ‰ (в среднем $\delta^2H = -78$ ‰), что свидетельствует о достаточно интенсивном перемешивании воды на акватории. На диаграмме δ^2H vs. $\delta^{18}O$ фигуративные точки для озерной воды практически всегда оказываются несколько смещены вправо относительно изотопного состава атмосферных осадков, что свидетельствует о влиянии испарения (рис. 6). Отметим, что в измерениях 2008–2009 гг. присутствовали только данные по кислороду-18, что не дает возможности идентифицировать эффект испарения, откуда следует, что в дальнейшем для корректной интерпретации исходных данных измерения должны включать оба параметра – и $\delta^{18}O$ и δ^2H.

В годовом разрезе времени наблюдается утяжеление изотопного состава воды в озере к концу лета (табл. 1 и рис. 7), что указывает:

1) на ослабление влияния весеннего половодья, привносящего в озеро изотопически легкую снеготалую воду;

2) поступление изотопически тяжелых летних осадков;

3) рост влияния испарения (на диаграмме δ^2H vs. $\delta^{18}O$ это отражается в постепенном смещении точек вправо от локальной линии метеорных вод).

В годовом разрезе времени происходит постепенное уменьшение размаха вариаций изотопного состава воды по акватории, отражая постепенное перемешивание водных масс.

Воздействие испарения на изотопный состав воды в Ладоге, однозначно диагностируемое по смещению фигуративных точек вправо относительно ЛЛМВ

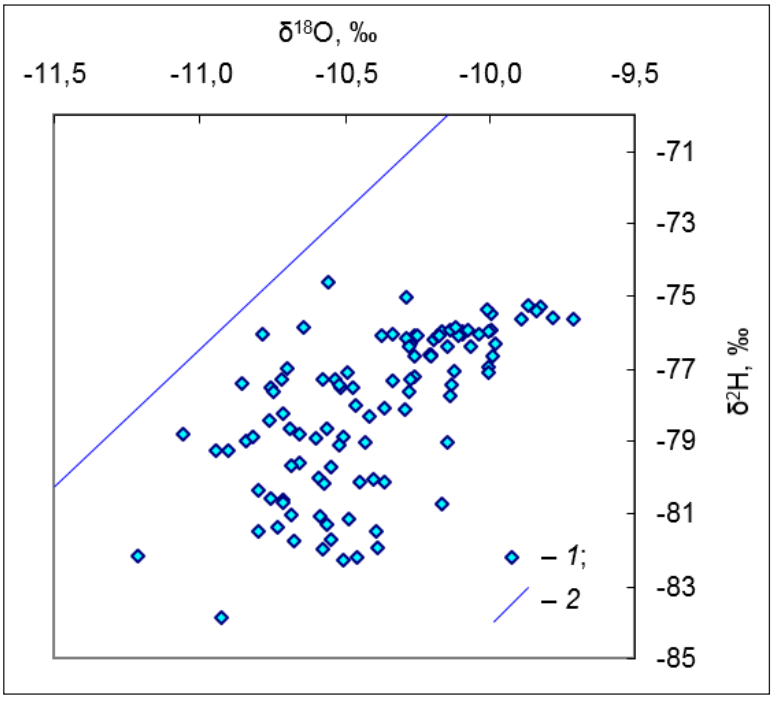

Рис. 6. Изотопный состав воды Ладожского озера по данным опробования в 2013–2016 гг. (в данных 2008 и 2009 гг. присутствуют измерения только изотопного состава кислорода): *1* – изотопный состав воды в Ладоге; *2* – локальная линия метеорных вод

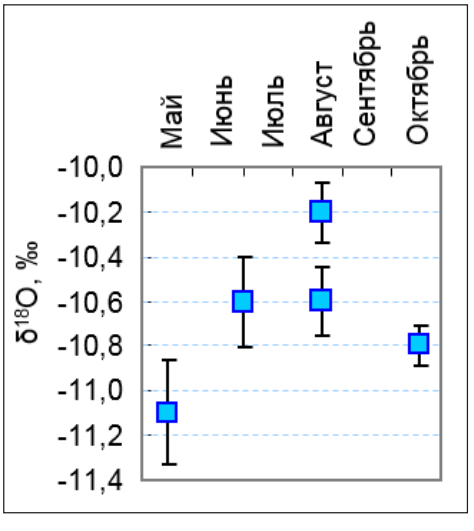

Рис. 7. Внутригодовое изменение среднего изотопного состава кислорода и размаха его вариаций в воде Ладожского озера

Таблица 1

Внутригодовое изменение среднего изотопного состава кислорода и размаха его вариаций в воде Ладожского озера

Дата	Средняя величина $\delta^{18}O$	Стандартное отклонение
Октябрь 2008 г.	–10,8	0,091
Май 2009 г.	–11,1	0,234
Август 2013 г.	–10,2	0,133
Август 2015 г.	–10,6	0,150
Июль 2016 г.	–10,6	0,321

на диаграмме δ^2H vs. $\delta^{18}O$, обусловлено неравновесным изотопным фракционированием. Расчет с использованием экспериментальных зависимостей смещения изотопного состава под действием испарения дает долю испаренной воды от 5 % весной до 28 % в конце лета, составляя в среднем около 18 %. Начальный изотопный состав воды (до испарения) может быть приблизительно определен по точкам пересечения ЛЛМВ с линиями, аппроксимирующими изменение состава воды при испарении. На данный момент эта оценка составляет δ^2H = –78...–91 ‰ и $\delta^{18}O$ = –11,2...–12,3 ‰, что в целом совпадает с данными по изотопному составу притоков и обнаруживает влияние испарения не только с водосбора, но и с зеркала воды в озере.

При детальном опробовании северной ванны Ладожского озера в 2015 г. в толще воды были обнаружены значимые вариации параметра $\delta^{18}O$ (рис. 8).

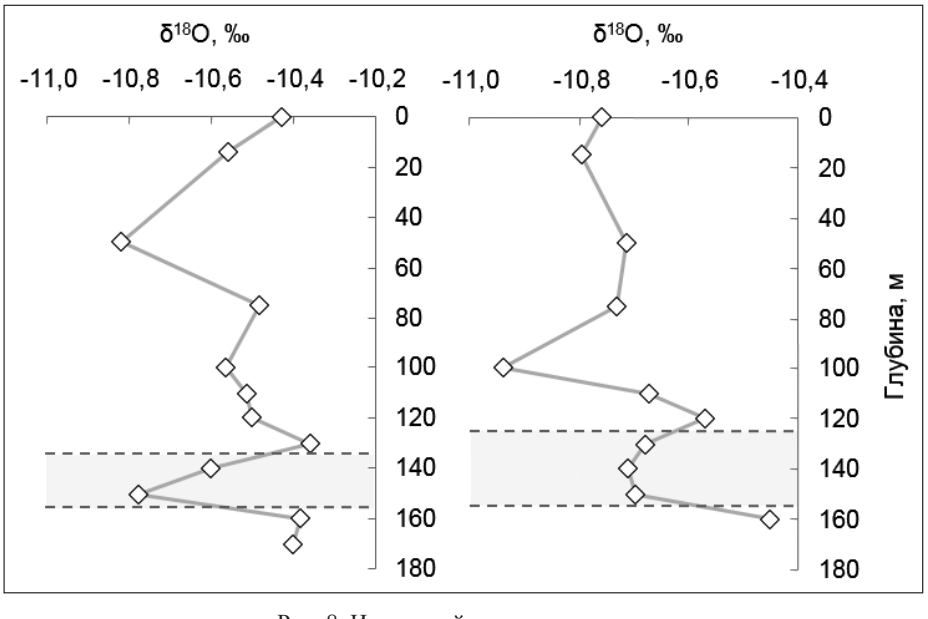

Рис. 8. Изотопный состав кислорода в разрезе водной толщи северной ванны Ладожского озера в 2015 г.

В придонной зоне несколькими точками по вертикали на глубинах 135–155 м фиксируется аномалия облегчения состава кислорода, происхождение которой нельзя связать с погружением в глубину слоя снеготалой изотопически легкой воды [7]. К влиянию последней нужно, скорее, отнести аномалии на глубинах около 30 м (см. рис. 8, левый) и 100 м (см. рис. 8, правый).

Местоположение аномалий и сопоставление условий их обнаружения с вышеприведенными данными по притокам и подземным водам, а также по геологическому строению озерного ложа дают основание предполагать, что их источником могут быть:

– речные воды, например Авлоги или другой, пока не идентифицированной реки с преимущественно подземным питанием, за счет их погружения по склону озерного ложа;

– субаквальная разгрузка подземных вод из рифейских отложений.

Субаквальная разгрузка подземных вод может быть связана с обнаруженной в северной части озера котловиной, которая прослеживается от берегового склона до основного ложа (рис. 9). Стенки этих глубоководных «каньонов» сложены песчаниками рифейского комплекса (рис. 10), который, как это указывалось выше, содержит в этой области изотопически легкие древние воды регионального потока.

На рис. 9 приведена поверхность дна в северной (глубоководной) части Ладожского озера, построенная по данным профилирований с помощью многолучевого эхолота EM2040. Результаты получены в 2012 г. совместно со специалистами ЗАО «МАРИМЕТР». На северных пологих склонах дна Ладожского озера породы рифейского комплекса обнажаются и в виде уступов и обрывов.

В 2009 г. в Западно-Валаамской глубоководной впадине, в которой по данным изотопных исследований в 2015 г. на точке № 105 (см. рис. 1) были зафиксированы локальные понижения концентрации стабильного изотопа кислорода, с борта НИС «Талан» были проведены геофизические исследования. Для изучения строения

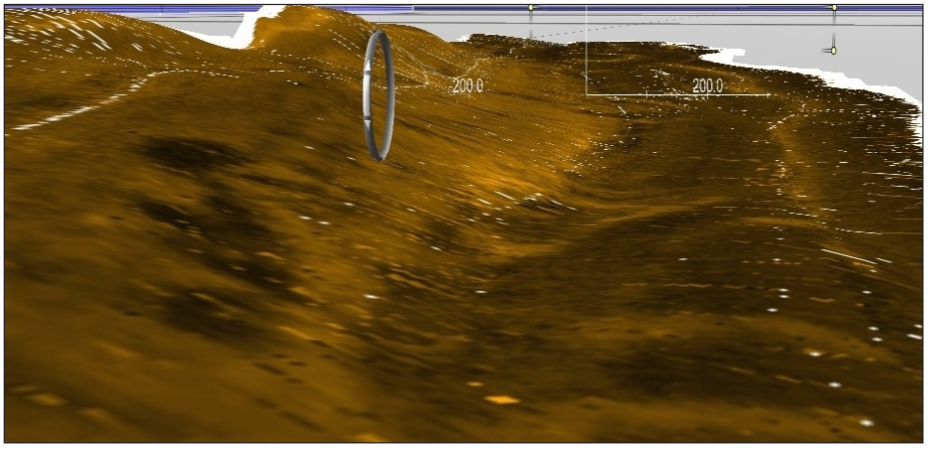

Рис. 9. Вид склона дна в северной части Ладожского озера, вдоль которого прослеживается обнажение рифейских пород. Получено с помощью многолучевого эхолота EM2040, глубины от 70 до 180 м

дна использовали сейсмоакустический комплекс «ГЕОНТ–HRP» для непрерывного сейсмоакустического профилирования Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ФГУП «ВСЕГЕИ»).

По геофизическим данным достаточно надежно выделяется рифейская грабен-синклинальная структура, которая ограничивает площадь развития самостоятельного рифейского водоносного комплекса (РВК) (см. рис. 10). Водоносные горизонты РВК связаны, скорее всего, с песчаниками рифея, а водоупором служат субвулканические образования валаамского силла. Плейстоценовая ледовая экзорация и эрозия привели к селективному выпахиванию рифейских песчаников с образованием естественных подводных обнажений в крутых склонах, где можно предполагать наличие зон разгрузки подземных вод (субаквальных напорных источников). У подножья уступа, расположенного в южной части профиля НСП с высокой долей вероятности также устанавливается крупное разрывное нарушение (разлом), вероятно, с обнажением не только водоупорных образований, но и локально водоносных песчаников. Геологическая интерпретация разреза в зоне указанного разлома: *а* – бронирующие габроиды валаамского силла; *б* – рифейские песчаники; *в* – четвертичные отложения; *г* – разгрузка воды из рифейских песчаников – приведена на рис. 10.

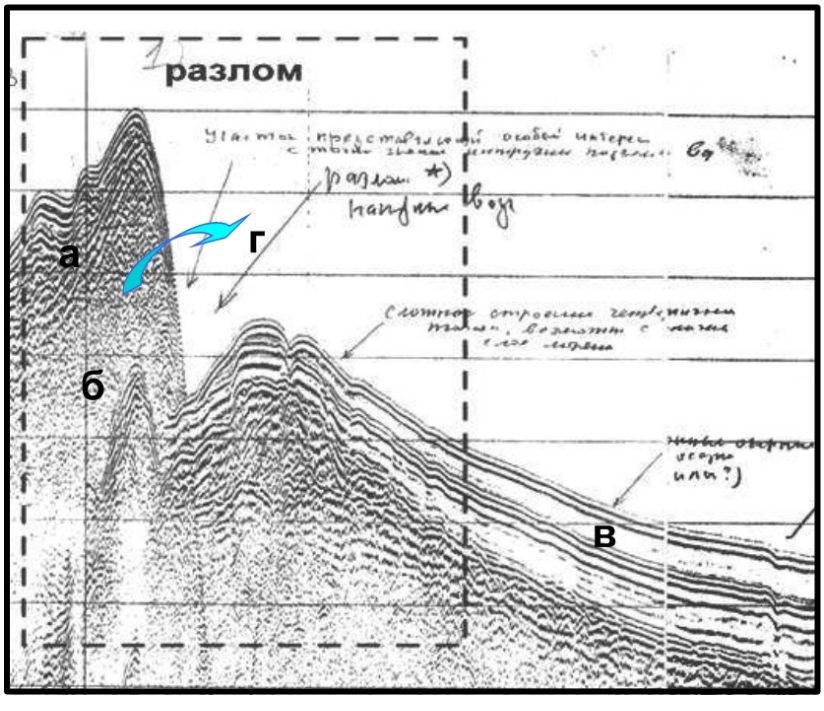

Рис. 10. Геологическая интерпретация разреза по профилю НСП в зоне разлома в Западно-Валаамской глубоководной впадине: *а* – бронирующие габроиды валаамского силла; *б* – рифейские песчаники (рифейского водоносного комплекса); *в* – четвертичные отложения; *г* – вода из рифейских песчаников

Таким образом, вблизи подводных обнажений рифейских песчаников на дне Ладожского озера на фоне относительно стабильного изотопного состава, близкого к среднему для Ладоги, обнаруживаются аномалии с более изотопически легкой водой.

Для выяснения природы аномалий предполагается провести дополнительные исследования в северной ванне озера с привлечением методов полевой геофизики и более детальным опробованием разреза воды.

Выводы

В 2008–2016 гг. в бассейне Ладожского озера выполнены работы по исследованию условий формирования баланса и динамики водных масс на базе данных об изотопном составе воды (содержаниях кислорода-18 – $\delta^{18}O$ и дейтерия – $\delta^{2}H$). Впервые получен значительный объем единовременных данных по распределению дейтерия и кислорода-18 в атмосферных осадках, поверхностном стоке, подземных водах и в водной толще Ладожского озера, а также проведены эксперименты по оценке влияния испарения на изотопный состав остаточной воды.

В 2012–2016 гг. на станциях Петродворец и Ламмин-Суо изотопный состав осадков варьировал в пределах $\delta^{18}O$ = –24,3...–6,1 ‰ и $\delta^{2}H$ = –183...–32 ‰, закономерно утяжеляясь летом и облегчаясь зимой. Взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков, рассчитанный с учетом распределения объема и состава выпадений во времени, составил $\delta^{18}O$ = –9,7 ‰ и $\delta^{2}H$ = –75 ‰. Локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) имеет вид $\delta^{2}H = 7{,}86 \cdot \delta^{18}O + 1{,}7$ (n = 187, R^2 = 0,98). В 2009–2016 гг. для атмосферных осадков на станции Петрозаводск аналогичные характеристики составили: вариации $\delta^{18}O$ = –30,9...–4,1 ‰ и $\delta^{2}H$ = –239...–26 ‰, взвешенный среднегодовой состав $\delta^{18}O$ = –11,7 ‰ и $\delta^{2}H$ = –84 ‰, ЛЛМВ – $\delta^{2}H = 7{,}66 \cdot \delta^{18}O + 4{,}5$ (n = 139, R^2 = 0,97).

По изотопному составу притоки Ладоги достаточно четко разделяются на три группы:

1. Авлога $\delta^{18}O$ = –12,2 ‰ – река с наиболее изотопически легкой водой и узким диапазоном вариаций изотопного состава кислорода во времени, по-видимому, является базисом разгрузки регионального потока подземных вод в восточной части Карельского перешейка и имеет незначительную долю атмосферного питания. Вероятно, в эту же группу следует отнести р. Янис вследствие малых вариаций изотопного состава, однако в ее питании принимают участие подземные воды только верхнего гидродинамического этажа.

2. Тулокса, Оять, Назия, Олонка, Тулема, Сясь, Паша, Видлица $\delta^{18}O$ = = –11,6...–11,2 ‰ – реки со средней по изотопному составу кислорода водой и несколько большим, чем в р. Авлоге, но мало различающимся и относительно небольшим размахом сезонных вариаций, по-видимому, имеют примерно одинаковый вклад подземного и атмосферного питания.

3. Свирь, Морье, Вуокса и Бурная, Волхов $\delta^{18}O$ = –10,4...–10,0 ‰ – реки с наиболее изотопически тяжелой водой, большим и значительно различающимся размахом сезонных вариаций, что указывает на преимущественно атмосферное питание.

Изотопный состав воды в Ладожском озере в целом относительно стабилен $\delta^{18}O$ = –11,7...–9,5 ‰ (в среднем $\delta^{18}O$ = –10,6 ‰), $\delta^{2}H$ = –84...–74 ‰ (в среднем

δ^2H = –78 ‰), что свидетельствует о достаточно интенсивном перемешивании воды на акватории. На диаграмме δ^2H vs. $\delta^{18}O$ фигуративные точки для озерной воды практически всегда оказываются несколько смещены вправо относительно состава атмосферных осадков, что свидетельствует о влиянии испарения. Расчет с использованием экспериментальных зависимостей смещения изотопного состава под действием испарения дает долю испаренной воды от 5 % весной до 28 % в конце лета, составляя в среднем около 18 %. Начальный изотопный состав воды (до испарения) составляет приблизительно δ^2H = –78...–91 ‰ и $\delta^{18}O$ = –11,2...–12,3 ‰, что в целом совпадает с данными по изотопному составу притоков и обнаруживает влияние испарения не только с водосбора, но и с зеркала воды в озере.

В разрезе водной толщи северной ванны Ладожского озера на глубинах 135–155 м фиксируется аномалия облегчения состава кислорода, происхождение которой может объясняться погружением речных вод, например Авлоги, по склону озерного ложа или субаквальной разгрузкой подземных вод из рифейских отложений. Последнее предположение кажется более достоверным, поскольку в дне северной ванны геофизическими работами обнаружены обнажения рифейских песчаников, лишенные осадочного покрова, а подземные воды рифейских отложений характеризуются несколько повышенной минерализацией и стабильной (во времени) температурой. Для выяснения природы аномалий предполагается провести дополнительные исследования с привлечением методов полевой геофизики и геохимии, а также более детальное опробование разреза воды.

Полученные результаты доказывают перспективность внесения изотопного опробования в состав исследовательских работ в бассейне Ладожского озера. Наличие индивидуальных особенностей в пространственном и временном распределении содержания дейтерия и кислорода-18 в притоках, озере и подземных водах позволяет обоснованно предполагать, что эти данные могут быть использованы при построении математических моделей соответствующих водных объектов.

Литература

1. *Водообмен* в краевых частях Балтийского щита и прилегающих артезианских бассейнах по изотопным и химическим данным (научные и прикладные аспекты). Карельский перешеек / Г.Ю. Воронюк, Г.С. Бородулина, И.А. Крайнюкова, И.В. Токарев // Труды Карельск. научн. центра. Сер. Лимнология. 2016, № 9. – С. 46–56.
2. *Голицын Г.С., Мелешко В.П., Ефимова Л.К. и др.* Анализ составляющих водного и теплового балансов на водосборе Ладожского озера, рассчитанных по моделям общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36, № 4. – С. 435–445.
3. *Калесник С.В.* Ладожское озеро. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 160 с.
4. *Мелешко В.П., Голицын Г.С., Володин Е.М. и др.* Расчет составляющих водного баланса на водосборе Каспийского моря с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34, № 4. – С. 591–599.
5. *Онежское* озеро. Атлас / отв. ред. Н. Н. Филатов. – Петрозаводск: Карельск. научн. центр РН, 2010. – 151 с.
6. *Моделирование* температурно-влажностного режима водосбора Ладожского озера / В.А. Румянцев, Л.К. Ефимова, Г.С. Голицын и др. // Изв. РАН. Сер. Географическая. 2007, № 1. – С. 130–135.
7. *Вариации* температурного и гидрологического режимов региона водосборного бассейна Ладожского озера в XX и XXI вв. по данным современных моделей климата / В.А. Румянцев, Л.К. Ефимова, Г.С. Голицын, В.Ч. Хон // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 1. – С. 26–34.

8. *СКИОВО* Карелия. Схема комплексного использования и охраны водных объектов Карелии бассейна Балтийского моря (российская часть бассейнов, код 01.05.00). Кн. 1. Общая характеристика бассейнов рек Карелии бассейна Балтийского моря (российская часть бассейнов). Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. – СПб., 2014. – 67 с.
9. *СКИОВО* Волхов. Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Волхов. Кн. 1. Общая характеристика бассейна реки Волхов. Невско-Ладожское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов. – СПб., 2015. – 87 с.
10. *Токарев И.В., Рыбакин В.Н., Румянцев В.А., Воронюк Г.Ю.* Гидрогеологический режим Карельского перешейка и разгрузка подземных вод в Ладожское озеро // Всеросс. конф. по крупным водоемам (V Ладожский симпозиум). Санкт-Петербург, 9–11 ноября 2016 г. Сб. научн. трудов. – СПб.: Ин-т озеровед. РАН, ООО «Изд-во "ЛЕМА"», 2016. – С. 426–430. ISBN 978-5-00105-077-3.
11. *Golitsyn G.S., Efimova L.K., Mokhov I.I. et al.* Changes of temperature of air and precipitation for the lake Ladoga basin according to results of long_term integration of ECHAM4/OPYC and HadCM3 models // Proc. Of the Fourth International Lake Ladoga Symposium 2002 / Eds: H. Simola, A.Yi. Terzhevik, M. Viljanen et al. – Joensuu, 2003. – P. 449–455.
12. *Jasechko S., Gibson J.J., Edwards T.W.D.* Stable isotope mass balance of the Laurentian Great Lakes // Journal of Great Lakes Research. 2014. V. 40. – P. 336–346.

УДК [556.55.012:502.175](282.247.212)

В.А. Румянцев, Л.Н. Крюков

АКТУАЛЬНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА КРУПНЕЙШИХ ВОДОЕМОВ РОССИИ НА ПРИМЕРЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

ФГБУН «Институт озероведения Российской академии наук» (ИНОЗ РАН), rum.ran@mail.ru

V.A. Rumyantsev, L.N. Kryukov

THE RELEVANCE OF OPTIMIZATION OF THE STATE MONITORING OF LARGEST RESERVOIRS IN RUSSIA ON THE EXAMPLE OF LAKE LADOGA

В статье на примере Ладожского озера осуществлен анализ выполнения государственного мониторинга на крупнейших водоемах России и сформулированы предложения по его коррекции. Показано, что выполнение всей программы мониторинга в полном объеме, как этого требуют руководящие документы, – задача неосуществимая не только сегодня, но и в будущем. Применение единой программы мониторинга на крупных и малых водоемах не оправдано. В государственном мониторинге крупнейших водоемов России целесообразно иметь две части: «базовую» и «индивидуальную». «Базовая часть» мониторинга должна основываться на унифицированной программе с перечнем единых показателей для всех без исключения крупнейших водоемов России. «Индивидуальная часть» мониторинга должна учитывать уникальность того или иного водного объекта, характер его использования и особенности хозяйственной деятельности на водосборе.

Ключевые слова: *актуальность, водоем, мониторинг, экология, безопасность.*

On the example of lake Ladoga, the analysis of implementation of state monitoring on the largest reservoirs of Russia and offers recommendations for its correction. It is shown that the implementation of the monitoring programme in full, as required by the governing documents, the task is not feasible, not only today but in the future. The use of a common monitoring programme on small and large reservoirs is not justified, as the latter often do not have high social significance. Based on the foregoing, the actual state monitoring of largest reservoirs in Russia, where it is advisable to have two parts: the "basic" and "individual". "Basic monitoring" should be based on a unified program with a list of indicators of change for all, without exception, the largest reservoirs of Russia. "Individual monitoring" should take into account the uniqueness of one or another water body, the nature of its use and characteristics of economic activities in the catchment.

Keywords: *actuality, body of water, monitoring, environment, safety.*

Введение

Автором общеизвестной концепции комплексного (экологического) мониторинга окружающей среды был выдающийся ученый и организатор науки академик РАН Юрий Антониевич Израэль. На базе этой концепции была разработана программа государственного мониторинга поверхностных водных объектов, которая включает в себя крупнейшие озера и водохранилища. Одним из основных было

требование обеспечения сопоставимости состояния водных объектов между собой и их изменений во времени. Данные мониторинга должны были обеспечивать выявление негативных изменений, происходящих под воздействием климатических и антропогенных факторов, и принятие неотложных мер по оздоровлению экологической ситуации на водных объектах, на которых изменения принимали угрожающие размеры и могли привести к непоправимым последствиям.

В результате был достигнут определенный прогресс в понимании происходящих в водных объектах природных процессов и в воздействии антропогенных факторов радиационного, химического и биологического происхождения на качество воды и гидробиологические сообщества. Это послужило основой для создания многих сотен различных документов – государственных нормативов (ГН), государственных стандартов (ГОСТ), руководящих документов (РД), методических указаний (МУ), методических рекомендаций (МР) и т. д., которые определили перечень охватываемых мониторингом показателей и методики проведения работ по их измерению, обработке и интерпретации результатов. Возникло закономерное стремление к учету все большего количества факторов, что привело к усложнению и увеличению объема выполняемых при мониторинге работ. В конечном счете требования руководящих документов по осуществлению государственного мониторинга вошли в противоречие с реальными возможностями его проведения на конкретных водных объектах.

Основная часть

Институтом озероведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН, Санкт-Петербург) был выполнен анализ текущего состояния государственного мониторинга Ладожского озера на его соответствие требованиям руководящих документов. Оказалось, что из пяти составляющих мониторинга (РД 52.24.309–2011) наблюдения за изменениями характеристик донных отложений, гидробиологических и токсикологических показателей вообще не проводятся. Гидрологическая составляющая мониторинга выполняется в крайне урезанном виде. Наблюдения осуществляются лишь тремя береговыми станциями – Валаам, Петрокрепость и Сторожно. Контроль на акватории озера за ледовыми, особо опасными и опасными гидрологическими явлениями не осуществляется, водные балансы, месячные и годовые, не составляются и т. д. Наибольший объем работ выполняется по гидрохимической составляющей государственного мониторинга Ладоги, но и он ведется по неполному перечню обязательных показателей, рекомендуемых руководящими документами. Наблюдения проводятся всего лишь раз в год, причем в различные сезоны и лишь в поверхностном слое воды, что не позволяет объективно выявлять межгодовую и вертикальную динамику изменений. В Ежегодниках качества поверхностных вод суши по Ладожскому озеру отсутствуют первичные данные по физико-химическим характеристикам воды и их вертикальному распределению [1].

Совершенно очевидно, что при таком сильно урезанном варианте мониторинга, в котором не осуществляются работы по гидробиологии, токсикологии и анализу донных отложений, полностью исключается возможность составить полноценную оценку состояния водоема и тем более дать прогноз и развернутые

рекомендации по принятию мер для оздоровления обстановки, что является основной целью мониторинга. Вывод в данном случае очевиден – Ладожское озеро не обеспечено системой государственного мониторинга поверхностных водных объектов, что является совершенно недопустимым, учитывая его огромную социально-экономическую значимость.

Более чем вероятно, что подобный вывод о невыполнении государственного мониторинга поверхностных водных объектов может быть сделан и по любому другому крупнейшему водоему России. При этом очевидно, что выполнение всей программы мониторинга в полном объеме, как этого требуют руководящие документы, – задача неосуществимая не только сегодня, но и в будущем. Встает естественный вопрос: что делать в этой ситуации? Ответ может быть только один: пора избавляться от иллюзии полного понимания и контроля за происходящими в водоемах процессами и стремления до бесконечности расширять перечень измеряемых при мониторинге показателей. В мире ежегодно появляются миллионы новых малоизученных химических соединений. Даже частичное включение их в программу государственного мониторинга требует колоссальных финансовых затрат на разработку нормативно-методической базы и оказывается неподъемным для экономики любой страны.

Мысль о необходимости модернизации системы государственного мониторинга поверхностных вод впервые была высказана авторами в работе применительно к крупнейшим водоемам России с площадью акватории выше 1 тыс. км^2, среди которых 12 озер и 18 водохранилищ. Совершенно очевидно, что модернизация мониторинга встретит сопротивление со стороны Росгидромета, займет достаточно длительное время и потребует выполнения серьезных научных разработок. И чем раньше будут начаты эти работы, тем скорее мы сможем обеспечивать экологическую безопасность на крупнейших водоемах России, а значит, сохранять биоразнообразие экосистем, рыбохозяйственный потенциал и здоровье людей, пользующихся питьевой водой и произведенными с ее применением продуктами.

Данная статья является продолжением работы ИНОЗ РАН [5, 8]. В ней высказаны некоторые дальнейшие предложения в направлении модернизации мониторинга крупнейших водоемов России.

Исходя из вышесказанного, далее будут рассмотрены основные положения новой программы государственного мониторинга только для крупнейших водоемов России, в которой целесообразно иметь две части: «базовую» и «индивидуальную» (табл. 1). Базовая часть мониторинга должна основываться на унифицированной программе с перечнем показателей изменений для всех без исключения крупнейших водоемов России. Этот перечень не должен быть излишне перегружен показателями, редко используемыми на практике и интересными лишь для узкого круга специалистов или отдельных потребителей.

Таблица 1

Составляющие государственного мониторинга крупнейших водоемов России

Базовая часть	Индивидуальная часть
Унифицированная программа для всех водоемов Единый перечень показателей	Для каждого водоема своя социально-ориентированная программа Свой перечень показателей

Цель базовой части государственного мониторинга крупнейших водоемов должна состоять в том, чтобы с помощью получаемых данных фиксировать основные процессы внутри водоема и их изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. В базовую часть мониторинга должны быть включены только наиболее важные гидрологические, гидрохимические, гидробиологические и токсикологические показатели, а также основные характеристики донных отложений. Представляется, что формирование этой части мониторинга не вызовет слишком больших проблем. Здесь главным образом следует воспользоваться уже имеющимися в руководящих документах наработками методического и нормативного характера и отобрать наиболее информативные показатели, осуществимые на всех крупнейших водоемах. Возможно, что потребуются и иные показатели, но их не должно быть много. Надо иметь в виду, что именно базовая часть мониторинга должна обеспечить сопоставимость и преемственность будущих данных мониторинга с имеющимися материалами наблюдений за прошлые годы. Не вдаваясь в детали базовой части мониторинга, отметим, что в нее обязательно должно быть включено составление сезонного и годового водных балансов как важных элементов при оценке воздействий климатических изменений [12], измерение концентраций соединений фосфора, азота и учета процессов в рамках системы «вода – базальты» [13].

Напомним, что в 2001 г. в Стокгольме на Конференции по химической безопасности ООН наиболее опасные органические соединения получили общее наименование – «стойкие органические загрязнители», СОЗ (англ. persistent organic pollutants, POP). В список СОЗ включены следующие вещества: дихлордифенил-трихлорэтан (ДДТ), альдрин, дильдрин, эндрин, хлордан, мирекс, токсафен, гептахлор, полихлорированные дифенилы (ПХД); гексахлорбензол (ГХБ), полихлордибензодиоксины (ПХДД); полихлордибензофураны (ПХДФ); альфа-гексахлорциклогексан, хлордекан, гексабромбифенил, гекса- и гептахлорбифениловые эфиры; линдан, пентахлорбензол, перфтороктановый сульфонат, его соли и перфтороктанового сульфонилфторида; тетрабромдифениловый эфир и пентабромдифениловый эфир.

В странах, ратифицировавших Стокгольмскую конвенцию, должен быть организован мониторинг СОЗ всех поверхностных вод. Представленный выше перечень СОЗ является фактически обязательным перечнем показателей в базовой части государственного мониторинга всех крупнейших водоемов России.

Индивидуальной частью государственного мониторинга крупнейших водоемов Северо-Запада России и, в частности, Ладожского озера является определение показателей рекомендуемых ХЕЛКОМ конвенцией о трансграничном переносе СОЗ и других опасных веществ в экосистеме Балтийского моря.

По определению ХЕЛКОМ конвенции к опасным соединениям относятся любые вредные вещества с такими свойствами, как стойкость, токсичность, способность к биоаккумуляции и сохранению молекулярной структуры на неопределенно долгое время (тяжелые металлы; галогенорганические соединения; органические соединения фосфора и олова; пестициды, фунгициды, гербициды, инсектициды, слимициды; нефтепродукты и углеводороды, входящие в состав

топлив; радиоактивные вещества; неразлагаемые материалы; вещества, оказывающие воздействие на вкус и запах морских продуктов и воды).

Между тем в последнее десятилетие было установлено, что лекарственные средства и продукты их превращений (метаболиты лекарственных соединений) стали часто детектироваться в объектах окружающей среды во многих странах мира. В настоящее время установлено, что более половины лекарств выводятся из организма человека в биологически активной форме, практически не теряя своих свойств. Хорошая растворимость большинства лекарственных препаратов в воде значительно затрудняет очистку сточных вод от данных соединений. Кроме того, они плохо разлагаются активным илом очистных сооружений и проходят через них транзитом, поступая затем в водоемы, водотоки и грунтовые воды. Работы по определению фармацевтических веществ в окружающей среде и выработке высокочувствительных аналитических методик их определения ведутся возрастающими темпами с конца 1990-х гг. в США, Канаде, Бразилии, Израиле и во многих европейских странах.

Заметим, что для определения СОЗ, других вредных веществ и лекарственных соединений требуется использование дорогостоящих современных импортных высокочувствительных аналитических методов, таких как высокоэффективная жидкостная хроматография и масс-спектрометрия [11]. Тем временем количество наименований примесей в природных и сточных водах (тяжелые металлы, пестициды, нефтепродукты и т. д.) достигает шестизначных цифр, а нормирована для водных объектов хозяйственно-питьевого и хозяйственно-рыбного пользования примерно тысяча вредных веществ. В этих условиях особое значение приобретает применение интегральных методов оценки токсичности воды, к которым относится биотестирование – экспериментальное определение токсичности воды для гидробионтов, основанное на регистрации реакций тест-объектов.

Биотестирование обеспечивает интегральную оценку токсичности воды, значительно сокращает объем химико-аналитических работ и позволяет оперативно проводить контроль загрязнений водных объектов [2]. Несмотря на свои преимущества, метод биотестирования имеет существенный недостаток – позволяет оценить только общую токсичность исследуемых образцов воды, природа же действующих токсичных веществ остается неизвестной. Закономерно, что в лаборатории комплексных проблем лимнологии ИНОЗ РАН были разработаны нетрадиционные методы биоидентификации опасных для водной среды ксенобиотиков с использованием в качестве тест-объектов дафний на основе изучения механизмов токсического действия различных загрязняющих веществ (ЗВ). Применение этого метода биоидентификации позволило сделать вывод, что причина систематического загрязнения вод в районе Волховской губы Ладоги – соли тяжелых металлов (табл. 2).

Зная механизмы специфического токсического действия ЗВ, можно с помощью различных фармакологических средств ослабить или усилить их эффекты (табл. 3). В настоящее время основной руководящий документ, согласно которому проводится биотестирование природных вод в РФ, – это РД 1180290 «Методическое руководство по биотестированию воды», в котором в качестве тест-объектов рекомендуются рыбы, водоросли и ракообразные (дафнии и цериодафнии).

Таблица 2

Пределы концентраций металлов в воде притоков Ладожского озера, мкг/л

Река	Fe	Al	Mn
Волхов	360–1900	56–905	78–400
Свирь	170–960	52–272	22–87
Бурная	101–378	64–237	9–63
Янис	367–795	20–254	10–82
Тулема	518–788	127–338	20–98
Видлица	580–860	40–130	49–187
Тулокса	1280–1756	36–344	65–187
Олонка	753–2209	46–397	64–210
Оять	502–2186	18–423	60–295
Сясь	526–1754	43–392	50–167

Из ракообразных в качестве тест-объектов наиболее часто используются ветвистоусые рачки *Daphnia magna*. Эти гидробионты являются фильтраторами и пропускают через свой организм большое количество воды, что обусловливает их высокую чувствительность к растворенным в воде веществам.

Естественно, что крупнейшие водоемы России отличаются друг от друга своим происхождением, возрастом, эволюцией развития, площадью зеркала и факторами хозяйственной деятельности на акваториях и водосборных бассейнах (табл. 4) [6].

Недоучет перечисленных различий при выполнении задач мониторинга не позволит объективно оценить современное состояние крупнейших водоемов и тем более дать правильный прогноз на будущее, то есть выполнять основные цели, поставленные перед государственным мониторингом водных объектов. Поэтому указанная выше базовая составляющая предлагаемой системы государственного мониторинга крупнейших водоемов должна быть дополнена индивидуальной частью мониторинга. Последняя должна учитывать уникальность того или иного водного объекта, характер его использования и особенности хозяйственной деятельности на водосборе. Таким образом, для каждого крупнейшего водоема будет своя индивидуальная программа мониторинга и перечень измеряемых показателей. Необходимость введения такой части при государственном мониторинге крупнейших водоемов показана в ИНОЗ РАН на примере Ладожского озера [3].

Ладога является уникальным природным объектом. Как и на Байкале, в ней со времен последнего оледенения сохранились гляциально-морские реликтовые организмы – представители растительного и животного мира. В озере живет кольчатая нерпа, а до экологической катастрофы 1970–80-х гг. прошлого века обитал осетр. Озеро является вторым по величине в России после Байкала и крупнейшим пресным водоемом Европы. Стратегическое значение Ладоги состоит в том, что она является источником централизованного питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения Санкт-Петербурга, ряда городов и населенных пунктов Ленинградской области и Республики Карелия. Геополитическое значение Ладожского озера заключается в том, что оно играет большую роль в формировании состояния

Таблица 3

Метод биоидентификации опасных токсичных соединений
на основе применения антагонистов (антидотов)

Классы токсичных соединений	Антидоты
Тяжелые металлы	Комплесообразователи (унитиол)
Фосфорорганические соединения	Холинолитики (атропин)
Хлорорганические соединения	Лекарственные препараты (диазепам)
Цианиды	Раствор глюкозы
Пиретроиды	Блокаторы кальциевых каналов (нипагин)

Таблица 4

Крупнейшие озера и водохранилища Российской Федерации

Озеро / водохранилище	Площадь акватории, км^2 (примечания)
Каспийское море	371 000 (общая площадь)
Озеро Байкал	31 500
Озеро Ладожское	17 870
Озеро Онежское	9720
Куйбышевское водохранилище	6450
Братское водохранилище	5500
Рыбинское водохранилище	4580
Озеро Таймыр	4560
Озеро Ханка	3940–5010 (2930 – РФ)
Озеро Чудско-Псковское	3555 (1985 – РФ)
Озеро Убсу-Нур	3350 (12 – РФ)
Волгоградское водохранилище	3310
Цимлянское водохранилище	2702
Зейское водохранилище	2420
Вилюйское водохранилище	2360
Усть-Хантайское водохранилище	2230
Чебоксарское водохранилище	2190
Красноярское водохранилище	2000
Озеро Чаны	1400–2000 (солоноватое)
Камское водохранилище	1910
Усть-Илимское водохранилище	1833
Саратовское водохранилище	1831
Шекснинское водохранилище	1670
Горьковское водохранилище	1590
Озеро Белое	1284 (зарегулировано)
Озеро Выгозеро	1250 (зарегулировано)
Новосибирское водохранилище	1170
Воткинское водохранилище	1120
Нижнекамское водохранилище	1080
Озеро Ильмень	770–2100

Финского залива и оказывает определенное влияние на экосистему Балтийского моря. Кроме того, в условиях постоянного роста дефицита пресной воды в мире Ладожское озеро может рассматриваться как потенциальный резервуар для поставок питьевой воды в остро нуждающиеся регионы России и другие страны [7].

Исходя из вышесказанного, становится понятным, что индивидуальная часть мониторинга Ладожского озера должна быть ориентирована на получение информации, необходимой для безопасного водоснабжения жителей Северо-Запада России. Тем более что постоянное и длительное влияние ладожской воды на жителей территорий водосбора Ладоги является одной из важных причин роста заболеваемости местного населения и особенно детей (табл. 5) [9].

Таблица 5

Заболеваемость взрослых жителей и детей до 14 лет
в Санкт-Петербурге, Республике Карелия и Новгородской области
по сравнению с заболеваниями населения Российской Федерации (случаи на 1000 человек)

Болезни взрослых/детей	Россия	Санкт-Петербург	Республика Карелия	Новгородская область
Новообразования	11 / 5	16 / 9	14 / 8	14 / 5
Хромосомные нарушения	2 / 12	2 / 16	4 / 20	3 / 19
Болезни мочеполовой системы	49 / 32	51 / 39	75 / 42	34 / 22
Болезни кожи	48 / 89	57 / 136	67 / 123	58 / 125
Болезни органов пищеварения	33 / 82	23 / 89	46 / 103	53 / 107
Инфекционные и паразитарные болезни	32 / 81	42 / 131	47 / 120	34 / 98

Заключение

Естественно, что государственный мониторинг каждого из крупнейших водоемов России будет иметь свои индивидуальные особенности, обусловленные геохимическими характеристиками ландшафта, уровнем антропогенного воздействия и может быть оптимизирован по-разному. По-видимому, для каждого крупного водоема следует разработать индивидуальные небольшие сборники методик мониторинга, что позволит быстро, экономично и продуктивно наладить работу по реализации нового государственного мониторинга крупнейших водоемов России.

Особо следует подчеркнуть, что на современном этапе развития систем государственного мониторинга водных объектов в развитых странах мира практически произошло смещение акцентов от определения характеристик качества воды в сторону оценки безопасности водной среды как местообитания живых организмов. Первостепенное значение приобрели проблемы сохранения водных экосистем с водой, пригодной для потребления человеком и для обитания промысловых гидробионтов. В частности, в качестве объективного индикатора состояния водной среды водоемов стал рассматриваться уровень сине-зеленого «цветения» воды. Известно, что сегодня в водоемах стали доминировать токсиногенные цианобактерии (сине-зеленые водоросли), которые при массовом размножении, или «цветении» воды, синтезируют особо ядовитые токсины. При «цветении» нарушается атмосферная аэрация воды, образуются цианотоксины, происходят заморы

рыб и гибель других гидробионтов, появляется неприятный запах и возникает опасная для здоровья человека и окружающей среды экологическая ситуация. За счет интенсивного размножения цианобактерий происходит повышение значений водородного показателя (pH) воды. В щелочной среде возникают на редкость благоприятные условия для развития вирусов полиомиелита, холерного вибриона и размножения различных патогенных микроорганизмов. К сожалению, даже в воде Ладоги с 2004–2005 гг. стали фиксировать цианотоксины [15].

В этой связи представляется целесообразным в ближайшее время оценить возможности on line применения мультисенсорной системы «электронный язык» по определению токсичности природной воды [14]. Заметим, что «электронный язык» разработан на основе потенциометрических сенсоров и активно исследуется более 10 лет. К достоинству этой мультисенсорной системы относится возможность проводить многократные измерения в автоматическом режиме.

Вне сомнений, что при разработке новой программы государственного мониторинга каждого из крупнейших водоемов России интерес представляет инновационная технология обработки информации с космических систем Terra/MODIS, Landsat-7, -8, WorldView-1, с помощью которых недавно были зафиксированы межсезонная и годовая изменчивости площади поверхности и береговой линии озера Ильмень и Цимлянского водохранилища [10]. По-видимому, при мониторинге континентальных водоемов следует шире использовать возможности глубинной обсерватории АГОС, с помощью которой в автоматическом режиме изучают дисперсное вещество и среду, в которой идет осаждение этого вещества (включая биоту). В состав АГОС включены три независимые системы наблюдений: 1) спутниковая (с интеграцией во времени для поверхностного слоя – самой верхней части деятельного слоя); 2) рейсовые исследования – непрерывное вертикальное и горизонтальное зондирование с полным комплексом работ на станциях (1–2 раза в год подъемом обсерваторий для замены питания и считывания данных); 3) изучение поверхностных слоев донных осадков и собственно осадков – природного самописца осадочного процесса и условий среды длительного действия (до сотен и тысяч лет) [4].

Литература

1. *Водные* ресурсы и водное хозяйство России в 2012 году (Статистический сборник) / под ред. Н.Г. Рыбальского и А.Д. Думнова. – М.: НИА-Природа, 2013. – 285 с.
2. *Загребин А.О., Румянцев В.А., Тонкопий В.Д.* Разработка методов биоидентификации ксенобиотиков для оценки качества вод // Водные ресурсы, 2016. Т. 43, № 1. – С. 92–96.
3. *Ладога* / под ред. В.А. Румянцева и С.А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – 468 с.
4. *Лисицын А.П., Лукашин В.Н., Новигатский А.Н., Амбросимрв А.К., Клювиткин А.А., Филиппов А.С.* Глубоководные обсерватории на транскаспийском разрезе – непрерывные исследования потоков рассеянного осадочного вещества // ДАН. 2014. Т. 456, № 4. – С. 485–489.
5. *Румянцев В.А., Игнатьева Н.В.* Система ранней диагностики кризисных экологических ситуаций на водоемах. – СПб.: ВВМ, 2006. – 152 с.
6. *Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В.* Великие озера мира. – СПб.: Лема, 2012. – 370 с.
7. *Румянцев В.А.* Еще раз об участии России в мировом рынке воды // Общество. Среда. Развитие. 2013, № 3. – С. 237–246.
8. *Румянцев В.А., Крюков Л.Н.* Новая парадигма государственного мониторинга крупнейших водоемов России на примере Ладожского озера // Фундаментальные проблемы воды и водных

ресурсов: Тр. Четвертой всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 15–18 сентября 2015 г. / ИВП РАН: отв. ред. М.В. Болгов – М.: ИВП РАН, 2015. – С. 20–23.

9. *Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Крюков Л.Н.* Влияние золь-гель процессов в бассейне Ладоги на медико-экологическую обстановку на территориях водосбора озера // Вестник РАН, 2016. Т. 86, № 1. – С. 43–47.
10. *Оценка* изменчивости береговой линии Цимлянского водохранилища и озера Ильмень по данным космического зондирования / В.А. Румянцев, Ш.Р. Поздняков, В.И. Уличев и др. // Исследование земли из космоса. 2017, № 1. – 35–43.
11. *Русских Я.В., Чернова Е.Н., Никифоров В.А., Жаковская З.А.* Лекарственные соединения в водных объектах Северо-Запада России // Региональная экология. 2014, № 1-2 (35). – С. 77–83.
12. *Внутривековая* изменчивость крупнейших озер России / Филатов Н.Н., Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А. и др. // ДАН. 2016. Т. 467, № 5. – С. 589–593.
13. *Шварцев С.Л.* Основные противоречия, определившие механизмы и направленность глобальной эволюции // Вестник РАН. 2015. Т. 85, № 5. – С. 63–73.
14. *Kirsanov D., Legin A., Legin E., Zagrebin A., Ignatieva N., Rybakin V*. Mimicking daphnia magna bioassay performance by an electronic tongue for urban water quality control // Analytica Chimica Acta, 2014. V. 824. – P. 64–70.
15. *Voloshko L., Kopecky J., Safronova T., Pljusch A., Titova N., Hrouzek P., Drabkova V*. Toxins and other bioactive compounds produced by cyanobacteria in Lake Ladoga // Estonian Journal of Ecology, 2008. V. 57. № 2. – P. 100–110.

УДК 575.5:[551.583+504]:556.55.072

Н.Н. Филатов, В.В. Меншуткин***

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМ КРУПНЫХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТА И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

* Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, nfilatov@rambler.ru;
** Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН

N.N. Filatov, V.V. Menshutkin

PROBLEMS OF ESTIMATION OF INFLUENCE CLIMATE AND ANTROPOGENIC FACTORS ON TO GYDROTHERMODYNAMICS AND ECOSYSTEMS OF LARGE STRATIFIED INLAND WATERS

В обзоре рассматриваются вопросы диагноза состояния и прогноза изменений термогидродинамики и экосистем крупных стратифицированных водоемов (Ладожского и Онежского озер, Белого моря) под влиянием климата и разнообразных антропогенных факторов с использованием экспериментальных данных и математического моделирования. Рассмотрены актуальные проблемы оценки этих изменений и пути их решения. Представлены различные 3D-математические модели и модели конечных автоматов для описания физико-химико-биологических процессов исследуемых водоемов, показаны пути совершенствования долгосрочного прогноза изменений экосистем для решения задач рационального использования и сохранения ресурсов водоемов.

Ключевые слова: *экосистемы, озера, эвтрофирование, модели, климат.*

The review deals with the diagnosis of the status and forecast of changes in thermohydrodynamics and ecosystems of large stratified water bodies (Ladoga and Onega lakes, the White Sea) under the influence of climate and diverse anthropogenic factors using experimental data and mathematical modeling. The actual problems of assessing these changes and ways to solve them are considered. Various 3D mathematical models and finite state machine models for describing the physico-chemical-biological processes of the studied reservoirs are presented. Ways of improving the long-term forecast of ecosystem changes for solving problems of rational use and conservation of reservoir resources are shown.

Keywords: *ecosystems, lakes, eutrophication, models, climate.*

Введение

Крупнейшие (великие) озера Евразии (Байкал, Каспий, Ладожское и Онежское) имеют стратегическое значение для развития экономики России. Необходимость сохранения и восстановления ресурсов озер Байкал, Ладожского и Онежского обсуждалась на Совете Безопасности РФ 20.11.2013 г., а на саммите Каспийских государств в ноябре 2014 г. отмечалась роль исследований Каспия [49]. В результате интенсивного антропогенного воздействия на водные экосистемы этих внутренних водоемов в 50–80-х гг. XX в. при интенсивном развитии

промышленности, сельского хозяйства наблюдались процессы антропогенного эвтрофирования и загрязнения, заметная деградации экосистем водоемов.

Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных озер и пути их решения

Эвтрофирование, загрязнение озер и морей – эти процессы в 80-х гг. XX – в начале XXI в. отмечались в глобальном масштабе, и для их решения были предприняты разнообразные меры по уменьшению биогенной нагрузки и поступления загрязняющих веществ на водосборы, в водоемы и в атмосферу. На многих водоемах мира были проведены мероприятия по восстановлению трофического статуса, улучшению качества вод [37, 67, 68, 70]. Среди впечатляющих примеров восстановления экосистем можно привести восстановление трофического статуса озера Вашингтон (США) из эвтрофного в олиготрофное состояние. Удалось улучшить качество вод «погибающего» озера Эри и приостановить процесс антропогенного эвтрофирования ряда озер Европы и Северной Америки [79, 86, 91, 94]. Вокруг проблемы влияния Байкальского ЦБК на загрязнение и эвтрофирование озера дискуссия продолжалась десятки лет, но закрытие комбината существенно не повлияло на изменение экосистемы. На Ладожском озере в 80-х гг. XX в. были предприняты меры по улучшению качества вод, уменьшению загрязнений при перепрофилировании Приозерского целлюлозно-бумажного завода в 1987 г. и совершенствовании технологических процессов на Волховском алюминиевом заводе. Но эти меры не привели к приостановке процесса антропогенного эвтрофирования.

После распада СССР в начале 90-х гг. XX в. произошло резкое уменьшение экономической деятельности на водосборах Ладожского и Онежского озер, а также Белого моря. Наблюдалось существенное уменьшение биогенной нагрузки и сброса вод от точечных и распределенных источников. Так, например, поступление фосфора в Ладожское озеро уменьшилось почти в три раза – с 6–7 до 2 тыс. т в год. В результате этого заметно повысилось качество вод, началось постепенное восстановление трофического статуса водоема [14, 28].

На Великих американских озерах, озерах Европы, Балтийском море мероприятия по уменьшению антропогенной нагрузки носили постепенный и системный характер в связи с внедрением новых «зеленых» технологий в промышленность и сельское хозяйство. Эти меры обеспечивались значительными инвестициями государств. А на крупных внутренних водоемах России уменьшение антропогенной нагрузки в начале 90-х гг. XX в. произошло за несколько лет из-за резкого изменения социально-экономических условий, которые происходили на фоне значительных климатических изменений. Уменьшение антропогенной нагрузки на Ладожское и Онежское озера определялось в основном закрытием производств или существенным уменьшением выпускаемой продукции, а не модернизацией предприятий и перевода их на экологически толерантные технологии из-за отсутствия необходимых инвестиций. До сих пор многие предприятия экономически выгодными для себя считают платить за выбросы в атмосферу и сбросы, а не за проведение модернизации производств, которые бы способствовали сохранению природной среды.

Несмотря на значительное уменьшение антропогенной нагрузки биогенными веществами, за последние 25 лет трофический статус Ладожского и Онежского озер не восстановился до олиготрофного [27, 36, 47]. Произошло это из-за вовлечения в оборот накопленных биогенов в процессе разложения органического вещества водными грибами и активизации микробиологических процессов. Как отмечает Н.А. Петрова с соавторами [27], «Резкое снижение поступления фосфора в озеро в 90-х гг. XX в. увеличило дисбаланс экосистемы... в последние годы отмечается принципиально новый этап функционирования экосистем озера при преобладании деструкционных процессов над продукционными». Рассматриваемые в работе водные экосистемы пережили период быстрых изменений и вступили в новую фазу некоторой стабилизации внутриводоемных процессов в новых условиях, в особенности это касается Ладожского и Онежского озер, а также Белого моря. Все перечисленное выше значительно усложнило диагноз и долгосрочный прогноз изменений гидрологического режима и экосистем крупнейших водоемов России.

Оценки влияния изменений климата на водные системы. Процессы изменения экосистем Ладожского, Онежского озер, Каспийского и Белого морей развивались на фоне заметного потепления климата с конца 80-х гг. XX в. до 2010 г., а затем в 2010–2016 гг. – при так называемом процессе «замедления» потепления, что отмечается как по данным экспериментальных измерений в глобальном масштабе, так и по данным измерений на водосборах указанных водоемов [7, 13, 50, 93]. В англоязычной литературе это замедление обозначается терминами «hiatus» или «plateau» [69]. «Замедление потепления», а также известные из многолетних наблюдений квазициклические изменения с временными масштабами порядка 60, 30 и нескольких лет практически не учитываются в моделях глобального климата для долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозах климата, на которых основываются соответствующие прогнозы изменений гидрологического режима и водных экосистем [5, 34, 49]. Таким образом, важной является проблема учета долговременного изменения климата из-за парникового эффекта и обнаруженных флуктуаций, обусловленных природными процессами. В настоящее время имеются соответствующие разработки, которые при моделировании изменений климата используют так называемый комбинированный сценарий изменений климата, в котором учитывался как «парниковый», так и «циклический» эффект [7, 26].

Требуется также использование натурных контактных и дистанционных наблюдений для оценки влияния изменений климата на экосистемы. Индикаторами влияния изменений климата на водоемы являются такие физические параметры, как ледяной покров, температура воды и колебания уровня воды. При этом знание закономерностей изменения уровня воды озер для широкого диапазона масштабов представляет наибольший практический интерес с точки зрения оценки водно-ресурсного потенциала, гидроэнергетики, водного транспорта, рекреации. Но даже долгосрочный прогноз изменений уровня озер, в особенности Каспия, оказался нетривиальной задачей из-за слабого понимания механизмов его вариаций [4, 15, 51]. Другими измеряемыми индикаторами колебаний климата на водные системы являются циклы биогенов, вселенцы, донные отложения, разнообразие организмов, населяющих водоемы, смена рыбных сообществ (холоднолюбивых на теплолюбивые) и др. [55, 62, 67, 79].

Изменения климата порождают сложные ответные реакции в водоемах в зависимости от разных причин. Важной фундаментальной проблемой является оценка вклада, масштабов влияния климатических факторов на озера. Для реализации этих целей озера более привлекательны по сравнению с морями и океанами, так как имеются многолетние данные по донным отложениям озер, температуре их воды, ледяному покрову, уровню воды и ряду химико-биологических характеристик, которые могут рассматриваться как индикаторы изменений климата. Причем эти данные в озерах собраны в более контролируемых условиях, чем в океанах и морях. Как показали натурные исследования [26, 29, 54, 67, 79, 80], при заметном глобальном потеплении климата на водосборах озер Евразии и Северной Америки за последние 30 лет реакция гидрологического режима и экосистем озер была разной в зависимости от региональных особенностей, влияния различных антропогенных факторов, особенностей ландшафтов и размеров водосбора. Наглядный тому пример – особенности изменений уровня крупнейших озер России – Ладоги, Онеги, Байкала и Каспия, особенности флуктуаций которых за более чем столетний период значительно различаются, несмотря на периоды заметного глобального потепления или похолодания климата (рис. 1) [49].

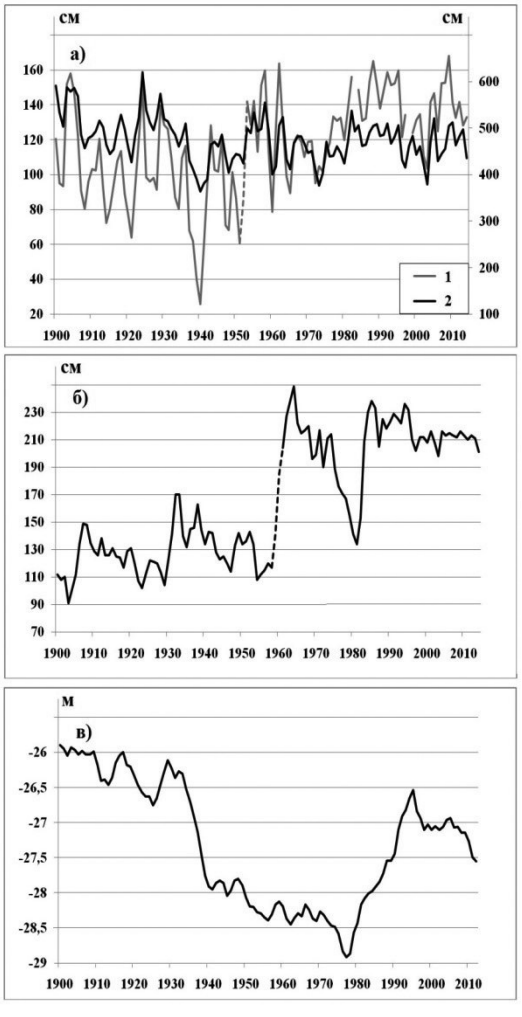

Рис. 1. Изменчивость уровня воды в озерах:
а – Ладожском (1) и Онежском озерах (2);
б – Байкале; *в* – Каспийском море-озере
(по данным за 1900–2015 гг. [49])

Поэтому для выявления общих и региональных закономерностей особенностей изменений водных экосистем требуется выполнение анализа на разнотипных водоемах. Такой, например, точный и простой для измерений индикатор изменений климата, как температура воды для озера Байкал, является таковым только по данным измерений лишь для вод верхних слоев воды до 300 м [54].

Долгосрочные и сверхдолгосрочные изменения гидрологического режима крупных водоемов. Как показал многолетний опыт, долгосрочное прогнозирование даже

уровня воды крупнейших водоемов, а в особенности Каспия, оказалось сложной проблемой [4, 7, 15] из-за недостаточного учета влияния переноса тепла и влаги из Атлантики, а также неопределенности сценариев и прогнозирования изменений климата до 2050–2100 гг. Несмотря на многочисленные попытки долгосрочных прогнозов изменений гидрологического режима, уровня воды Каспия, озер Ладожского, Онежского, Байкал, а также Великих американских озер (ВАО) с использованием ансамбля моделей общей циркуляции океана и атмосферы (МОЦОА), моделей гидрологического режима, большого объема натурных дистанционных и контактных наблюдений, до сих пор отмечается большая неопределенность долгосрочного прогнозирования гидрологического их режима [49]. Так, для ВАО эти расчеты в основном основаны на «парниковой» парадигме, и к 2100 г. прогнозируется уменьшение их уровня воды на 1–2 м, тем не менее возможны сценарии с его повышением [56, 67].

Эта неопределенность затрудняет планирование экономической деятельности, принятие мер по адаптации к возможным региональным изменениям климата и экосистем, разработку мер по рациональному использованию и охране ресурсов водоемов. Поэтому важной задачей остается совершенствование системы прогноза внутривековых и сезонных изменений колебаний уровня воды, гидрологического режима и экосистем крупных озер. Задача сверхдолгосрочного прогноза изменения гидрологического режима исследуемых водоемов решается в проекте РНФ «Озера России – диагноз и прогноз…» с использованием МОЦАО, разработанной в ИВМ РАН [5], с применением комбинированного сценария климатических изменений, основанного на композиции «парникового» и «циклического» эффектов для оценки транспорта влаги из Атлантики [7, 25, 26]. Этот подход позволяет описывать не только рост температуры воздуха, вызванный эмиссией парниковых газов, но и известную по данным наблюдений изменчивость климата с временными масштабами несколько десятков (порядка 60) лет.

Нерешенные проблемы долгосрочного прогнозирования гидрологического режима, уровня воды исследуемых водоемов, слабое использование систем поддержки принятия управленческих решений, основанных на соответствующих математических моделях, не позволяют оптимально решать задачи рационального использования и охраны крупнейших озер России.

Экономическая оценка предельной (допустимой) нагрузки, оценка ассимиляционного потенциала водоемов. Слабое использование систем поддержки принятия управленческих решений. Резкое ухудшение состояния природной среды, в том числе водоемов, и медленное их восстановление, которое требует значительных инвестиций, привели к необходимости экономического оценивания нагрузки на природную среду, создаваемую в результате хозяйственной деятельности, и, как следствие, потребовали наряду с правовыми и административными использование экономических методов регулирования [33, 36]. В работах [21, 35] показано, что «…одним из важнейших факторов сохранения биосферы и обеспечения ее устойчивости является ассимиляционный потенциал (АП) природной среды. АП природной среды – это ее самовосстановительная способность по отношению к поступлению в природную среду вещества и энергии в результате хозяйственной деятельности. Фактически АП является свойством экологических

систем "сопротивляться" внешним воздействиям. АП представляет собой особый вид природного ресурса и как ограниченный природный ресурс нуждается в экономической оценке». Иначе говоря, количественные оценки АП представляют собой границы допустимой антропогенной нагрузки, позволяющей сохранять озеро в олиготрофном состоянии. Для получения допустимых значений антропогенной нагрузки на Ладожское и Онежское озера были использованы модели гидротермодинамики и модели экосистем озер [30–32]. По данным моделирования и экспериментальных работ ИНОЗ РАН [14, 27] было определено, что нагрузка на экосистему Ладожского озера может быть на уровне 4000 т P_{total}/год, в этом случае озеро будет сохранять слабо мезотрофное состояние. С использованием моделей, разработанных в [2, 18–20, 30], АП по сбросу фосфора для Ладожского озера должен быть порядка 2500 т P_{total}/ год, а для Онежского озера АП по сбросу фосфора – 600–800 т P_{total}/ год и по сбросу азота – 15 000 т N_{total}/год [89]. Специальный вопрос о получении экономических оценок АП для озер, с помощью которых могут рассчитываться платежи за сбросы биогенов и загрязняющих веществ, рассмотрен в работах [17, 30–36].

Для рационального использования и охраны озера Байкал оказалось недостаточным даже наличие федерального закона. Однако практическая реализация этого закона, даже с использованием средств на его реализацию и поддержку федеральной целевой программы (ФЦП), оказалась непростой [39]. Как отмечал на заседании президиума РАН академик М.А. Грачев, действующая федеральная целевая программа «"Об охране озера Байкал..." содержит множество мероприятий, не имеющих отношения к охране озера. Необходима экспертиза программы под эгидой РАН…». И в результате в 2015–2016 гг. управлять использованием ресурсов озера в условиях маловодного периода пришлось в нарушение принятого закона, путем принятия специального Постановления Правительства РФ. Происходит это из-за недостаточного научного обоснования принятого закона. Этот пример указывает на необходимость тщательного научного обоснования разрабатываемых в настоящее время проектов закона об охране Ладожского и Онежского озер.

Таким образом, для решения проблем рационального использования и охраны крупнейших водоемов, имеющих стратегическое значение для развития экономики страны, требуется реализация комплекса мер экономического и законодательного характера, которые должны основываться на фундаментальных научных знаниях о состоянии экосистем и прогнозировании их изменений. Для этого требуется развитие экспериментальных натурных наблюдений, мониторинга и применение математических моделей, которые являются основой для разработки систем принятия управленческих решений с использованием экономических мер.

Постановка экспериментальных исследований термогидродинамики и экосистем на Ладожском, Онежском озерах и Белом море и пути их развития. Как отмечалось в докладе В.А. Румянцева с соавторами на Всероссийском гидрологическом съезде в 2013 г., «на водоемах практически не развивалась сеть наблюдений, оснащение ее приборами, оборудованием и плавсредствами оставляет желать лучшего». Так, организациями Росгидромета практически прекращены наблюдения на акватории водоемов за гидрологическими характеристиками,

на Ладожском и Онежском озерах Росгидромет уже много лет не имеет собственного флота, сокращены наблюдения за гидрохимическим режимом, параметрами качества воды, стандартный мониторинг осуществляется зачастую организациями, выигравшими конкурс на осуществление мониторинга, но не имеющими современных средств его проведения. Отметим также малую доступность данных гидрологических наблюдений (http://hydrolare.net/database.php), получаемых на сети Росгидромета.

На исследуемых водоемах практически отсутствуют долговременные (месяцы и годы) наблюдения за течениями с автономных буйковых станций, как это было в 70-х гг. прошлого века [40, 41], а также современных дрейфующих буев, которые сейчас широко используются в океанах. Неимение этих средств наблюдений не позволяет корректно решать задачи математического моделирования гидродинамики с усвоением данных измерений, разработки систем оперативного мониторинга [6]. Все это ограничивает возможности калибрации и верификации моделей, возможности прогнозирования термогидродинамических процессов и явлений. Только по экспериментальным данным сложно разделить вклад климатических и антропогенных воздействий на водные экосистемы, поэтому требуется сочетание целенаправленных измерений и математического моделирования.

До сих пор по данным как натурных измерений, так и моделирования, очень слабо остается изученным зимний режим крупных водоемов подо льдом. Исследования в зимнее время подо льдом в основном были сосредоточены на малых и средних озерах Северного полушария [66, 76, 93], в то время как зимний режим крупнейших озер мира и морей изучен в гораздо меньшей степени. Главной причиной недостатка зимних наблюдений крупных озерных систем является практическая сложность организации на Ладожском и Онежском озерах, Белом море, полевых исследований со льда который, как правило, нестабилен, имеет многочисленные трещины и полыньи [50, 75].

Значительный интерес вызывают проблемы изучения реакции озерных экосистем на глобальное потепление, понимание роли озер с ледовым покровом в выбросах парниковых газов в глобальном углеродном балансе. Таким образом, до сих пор процессы подо льдом крупных озер мира по-прежнему остаются «белым пятном» в современной лимнологии. Только в последние годы начали проводиться комплексные мультидисциплинарные исследования подо льдом крупных озер Байкал, Телецкое, Вендюрское, а также ВАО [66, 80, 87, 93], а с 2014 г. начаты уникальные комплексные междисциплинарные исследования подо льдом Ладожского и Онежского озер [48].

Среди других проблем получения экспериментальных данных для понимания функционирования водных экосистем водоемов отметим такие, как роль разных элементов озерной экологической системы – инвазивных видов, простейших и водных грибов. Методика определения эколого-физиологических характеристик для включения их в модели экологической системы еще слабо разработана [14, 27, 32]. Учет этих сведений по экспериментальным данным в математических моделях возможно осуществлять только в виде коэффициентов и калибровкой соответствующих моделей [32, 83, 95].

Очевидно, натурные экспериментальные исследования возможны только в отношении ограниченного числа характеристик системы, то есть экосистема в натурных условиях не является полностью наблюдаемой, в то время как математическому моделированию в принципе доступны все элементы экосистемы озер [17]. Поэтому для понимания процессов изменения экосистем под влиянием климата и антропогенных факторов требуется использовать синтез наблюдений и математического моделирования.

Разработка и применение математических моделей для изучения термогидродинамики великих озер Евразии. Гидродинамика озер является результатом воздействия большого числа различных процессов, которые имеют широкий диапазон пространственно-временных масштабов. Понимание закономерностей течений, циркуляции вод в озерах важно для оценки переноса и трансформации вещества, прогнозирования изменений экосистем водоемов при разнообразных антропогенных и климатических изменениях. Знание сезонной и многолетней циркуляции вод используется при построении моделей экосистем в задачах рационального использования, охраны ресурсов озер и управления водопользованием.

При разработке математических моделей экосистем важно знание закономерностей термогидродинамических процессов и явлений и учета подсеточных процессов в явном виде или путем параметризации в моделях. Особенности гидродинамики крупных стратифицированных пресных озер зависят от закономерностей распределения полей температуры воды озер, аномальных свойств пресной воды, имеющей максимальную плотность при температуре 3,98 °С, влияния силы Кориолиса и пограничных слоев, которые занимают значительно большую площадь, чем в морях и океанах, а также от физических размеров озер, особенностей морфометрии, географической широты, внешних воздействий (потока тепла через поверхность, ветрового воздействия, осадков и испарения, речного стока). Условно гидродинамические процессы в озерах можно разделить на крупномасштабные компоненты с временными масштабами, большими синоптического и пространственными, охватывающими озеро или его отдельные части. К процессам, формирующим эти крупномасштабные компоненты, относятся топографические волны Россби, волны Кельвина, Пуанкаре, мезо- и мелкомасштабные, штормовые нагоны, апвеллинги, вихревые образования, внутренние и поверхностные волны, циркуляции Ленгмюра и др. С точки зрения геофизической гидродинамики имеются четкие критерии отнесения озера к крупному, среднему или малому с помощью параметра Бургера (Burger) *S,* который представляет собой отношение внутреннего (бароклинного) радиуса деформации Россби $R_R = c/f$ к характерному горизонтальному размеру озера [65]:

$$S = g\frac{\Delta\rho}{\rho}\frac{\sqrt{D}}{Lf} = \frac{c_i}{Lf},$$

где D – характерная глубина; L – горизонтальные размеры стратифицированного водоема; c – фазовая скорость баротропных или бароклинных волн; f – параметр Кориолиса.

Для очень крупных (великих) димиктических озер мира, таких как Байкал, Мичиган, Верхнее, Онтарио, Гурон, Эри, Ладожское и Онежское, имеющих

горизонтальные размеры – сотни километров, а глубины – десятки и сотни метров, R_R составляет несколько километров, S_i мало и в период летней стратификации составляет 0,03–0,05, причем в этих водоемах сила Кориолиса играет важную роль в гидродинамике, формируя волны Кельвина и Пуанкаре, крупномасштабную циркуляцию вод, имеющую тенденцию к циклонической циркуляции. Озера, в которых R_R сопоставим с горизонтальными размерами озера, S_i составляет 0,1–0,5, и эффекты вращения Земли также могут быть важны в формировании динамики вод, например в озерах Женевском, Венерн и Веттерн (Европа), Телецком, Бива, Киннерет (Азия), которые можно отнести к озерам средних размеров. В стратифицированных озерах с характерными размерами несколько километров S_i составляет 0,3–0,5. В таких озерах влияние эффекта вращения Земли на гидродинамику незначительно, в них отсутствуют бароклинные волны Кельвина и Пуанкаре [21, 65, 66].

Натурные исследования течений крупнейших озер мира [40, 41] свидетельствуют о том, что существует устойчивая тенденция формирования крупномасштабной, охватывающей озеро или его крупные части, циркуляции вод циклонического типа, в особенности в период существования термобара. Эта тенденция проявляется при масштабе осреднения полей течений большем, чем синоптический. При моделировании экосистем великих озер мира для сезонных и климатических временных масштабов, то есть от нескольких суток до нескольких десятков лет, нет необходимости воспроизводить весь широкий спектр термогидродинамических процессов и явлений. Выбор масштабов зависит от целей и задач исследований. Для явлений, которые необходимо параметризовать (циркуляции Ленгмюра, волны Пуанкаре, апвеллинги, термобар, грибовидные вихревые структуры, внутренние волны для широкого диапазона волновых чисел), разработаны соответствующие модели [66, 72, 73, 84, 96].

Для больших стратифицированных озер гидродинамические процессы особенно разнообразны в период стратификации. Это выражается в наличии в данный период как развитой вертикальной стратификации, так и горизонтальных температурных неоднородностей. Например, на Ладожском озере амплитуда горизонтальных изменений температуры может достигать 15 °С между мелководьем на юге и глубоководной зоной на северо-западе озера и по вертикали 15 °С [38, 41]. Это определяет, в частности, необходимость использования для моделирования трехмерных математических моделей. По данным работ [41, 58, 90, 95] известно, что климатическая циркуляция для крупных озер складывается из относительно крупномасштабных, повторяющихся из года в год, циркуляций, охватывающих основную часть водной массы озера или его большие части течениями циклонического характера, а также сопутствующих антициклонических циркуляций. В соответствии с предложением А.С. Монина [24] классификация движений океана характеризует крупномасштабную циркуляцию как статистический ансамбль движений таких образований в океане, которые могут быть воспроизведены индивидуально. Принятие такой точки зрения при численном моделировании динамики вод озер приводит к понятию «крупномасштабная циркуляция». По аналогии с этим подходом для больших стратифицированных озер под крупномасштабными циркуляциями будем подразумевать такие образования

в озере, размеры которых сопоставимы с характерными горизонтальными размерами озера [34].

Так, для характерных размеров Ладожского и Онежского озер по горизонтали порядка 10^5 м и глубине порядка 10^2 м для дискретных математических моделей климатического масштаба индивидуальное описание может быть дано лишь для «глобальных» элементов динамики озера (циркуляций вод циклонического и антициклонического тапа, так называемых общеозерных, охватывающих озеро или его крупные части). А моделирование течений и температурного режима озера для относительно краткосрочных временных периодов, порядка синоптического или сезонного, можно интерпретировать как задачу воспроизведения реальности, моделирование и осреднение циркуляции озера за определенное достаточно большое количество лет — как воспроизведение климатической циркуляции. Воспроизведение климатической циркуляции сводится к построению периодического решения, для чего требуется проводить вычисления на физическое время, кратное времени условного водообмена озера, которое для Ладожского и Онежского озер приблизительно равно 12–14 годам. При этом отметим, что данные оценок о времени условного водообмена (retention time) не являются представительными для понимания реальных процессов переноса, перемешивания вод, поскольку перемешивание в прибрежной зоне озер может быть до 4 порядков интенсивнее, чем в глубоководной, что приводит к более высокой интенсивности поступления биогенов в придонные слои [59, 89, 93]. Так, например, условный водообмен, определенный как суммарный среднемноголетний сток к объему вод озера Байкал, составляет около 350 лет [54], а по данным измерений этот водообмен может быть в разных зонах озера всего до 16 лет.

Математическое моделирование экосистем крупных стратифицированных озер. Многие процессы и явления живой природы описываются дифференциальными уравнениями (которые основаны не на физических законах, и не на уравнениях химических реакций) и не могут быть воспроизведены точно на языке химических реакций [17]. Основу уравнений экологических моделей озерных систем составляют различные эмпирические закономерности, установленные в процессе изучения и обработки результатов наблюдений и содержащие в изобилии эмпирические зависимости и параметры [1]. Константы или коэффициенты в этих закономерностях не являются универсальными, в отличие от физических законов. Именно это стало одной из значимых причин, затрудняющих создание универсальных моделей водных экосистем. При конструировании экологических моделей озер, как отмечается в [17, 21, 74], самое важное – это наличие качественных исходных данных, а стремление к возможно большей детализации должно быть уравновешено пониманием того, что резкий рост числа переменных в модели, как правило, не улучшает ее. Также важно то, что при создании модели экосистемы необходимо опираться на выполнение законов сохранения вещества и энергии в водной экосистеме.

Практика применения моделей для Ладожского и Онежского озер показала, что для калибровки и верификации моделей полезным является создание таблиц феноменологии процессов и явлений в озерах, полученных по данным многолетних исследований, например о времени начала формирования и окончания разрушения

термобара, термоклина, становления и разрушения ледяного покрова и др. [34]. Таким образом, до сих пор актуальным является сбор необходимых данных натурных наблюдений, полученных на акватории озера, и спутниковых измерений, необходимых для калибрации и верификации моделей.

При разработке моделей экосистем больших стратифицированных озер должны обеспечиваться условия выполнения законов сохранения вещества, если нет источников и стоков, и законов изменения, если есть обмен веществом на границах водоема [18–21].

Одной из важнейших задач сохранения водных ресурсов является создание интегрированных систем управления водопользованием, обеспечивающих информационную поддержку органов природоохраны [8, 21]. Задача управления экосистемой озера для крупных озер, таких как Великие американские озера, Байкал, Ладога, Онега, при современном состоянии знаний об этих объектах и особенно их реакций на внешние воздействия еще далека от своего практического воплощения [10, 14, 74, 80]. Без надежного мониторинга и натурных экспериментов никакая, даже самая лучшая, теория не способна обеспечить работоспособные рекомендации по управлению данной озерной экосистемой. Но без проверенной и хорошо обоснованной теории самые тщательные и подробные измерения параметров экосистемы в лучшем случае приведут к необходимости использования модели типа «черного ящика», что, как показывает опыт, далеко не всегда приводит к успеху [17].

Любые построения типа «игры с природой» могут оказаться бесполезными в случае применения слишком упрощенной модели или модели, не учитывающей существенных свойств объекта. Для водных экологических систем это особенно важно, поскольку они склонны к адаптационным изменениям, которые приводят их в состояния, которые никогда до этого не наблюдались [21].

Для Ладожского и Онежского озер в СПб ЭМИ РАН был разработан комплекс математических моделей [2, 17, 89], которые создавались на основе натурных данных и знаний, полученных в ИНОЗ РАН [14, 27] и ИВПС РАН [27, 89]. При этом в качестве средних многолетних среднемесячных значений внешних воздействий на водоем использовались результаты обработки данных наблюдений, представленные в трудах Института озероведения РАН [14, 27] и трудах ИВПС КарНЦ РАН [47, 89].

Постановка задачи математического моделирования. Для описания крупномасштабной циркуляции и термического режима больших стратифицированных озер, расположенных вне экваториальной зоны в Северном полушарии, используют записанные в декартовой системе координат трехмерные математические модели геофизической гидротермодинамики океана [2]. Декартову систему координат здесь можно использовать потому, что, как правило, протяженность пресноводных озер позволяет пренебречь кривизной Земли и считать невозмущенную поверхность водоема плоской. При этом, как и для океана, принимается следующее: приближение Буссинеска, приближение гидростатики, упрощение кориолисовых членов и замена параметра Кориолиса на постоянное значение для данной широты озера, уравнение переноса энтропии приближенно записывается в форме уравнения переноса тепла для движущейся среды. Подробно система

уравнений, граничные и начальные условия моделей ТГД, параметризация горизонтального и вертикального обменов описаны в работах [2, 17, 32]. Следует отметить, что для пресноводных водоемов неприемлемо использование линейного уравнения состояния ввиду того, что температура пресной воды наибольшей плотности (T = 3,98 °С) играет важную роль в формировании поля температуры водоема.

При постановке граничных условий следует учитывать, что для формирования водного баланса, теплового режима и качества воды многих крупных озер речной приток и сток играют важную роль. Для озер важно также учитывать осадки и испарение. Свободная поверхность водоема задается функцией $\xi(x, y, t)$, то есть выражается уравнением $z = \xi(x, y, t)$. Если учитывать при моделировании гидротермодинамики водоема воспроизведение крупномасштабной климатической циркуляции, то для больших глубоких озер можно считать величину $\xi(x, y, t)$ малой по сравнению с глубиной водоема, и поэтому граничные условия, которые ставятся на поверхности водоема, можно задавать на невозмущенной поверхности водоема при $z = 0$ [2, 32]. Такое предположение вполне оправдано, если речь не идет о воспроизведении процессов синоптического масштаба, например штормовых нагонов. Это относится как к кинематическим, так и к динамическим краевым условиям. Для поверхности таких озер, как Ладожское, обычно пренебрегают горизонтальным градиентом атмосферного давления.

Трехмерные модели с упрощениями. Разработанные в СПб ЭМИ РАН модели ТГД для Ладожского и Онежского озер и программные комплексы в большинстве своем основаны на примитивных уравнениях в формулировке, приведенной в данном обзоре. Однако для решения некоторых задач вполне приемлемыми оказываются модели, в которых приняты некоторые упрощения, облегчающие получение численных решений. Так, для воспроизведения климатической циркуляции больших стратифицированных озер вполне приемлемыми оказались модели типа приведенной в монографиях Г.И. Марчука с соавторами [16] модели климатической циркуляции океана. Как показала практика моделирования термогидродинамических процессов в климатическом масштабе в упрощенном варианте, могут быть отброшены инерционные члены и члены, определяющие горизонтальный турбулентный обмен. Параметр Кориолиса l ради простоты считается постоянным. В качестве уравнения состояния принимается одна из эмпирических зависимостей вида $\rho = \rho(T)$, в которой не учитывается зависимость плотности от давления. Для Ладожского и Онежского озер, как показала практика [2, 30–36], это оправдано.

В моделях при относительно небольших глубинах часто используется следующее уравнение состояния пресной воды [90]:

$$\rho(T) = \rho_w\left[1 - 6{,}8\cdot 10^{-6}\left(T-4\right)^2\right], \quad [T] = ^\circ\mathrm{C}.$$

Уравнение переноса тепла в модели климатической циркуляции озер имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(v_x\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_y\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right).$$

Коэффициенты v_x, v_y, v_z, k_z считаются функциями переменных x, y, z и t;

$$v_0 = \begin{cases} 0 – \text{в точках твердой границы (условие непротекания),} \\ \text{заданное значение – в створах втекающих и вытекающих рек.} \end{cases}$$

В работах [2, 89] представлена реализация сформулированной модели; ее назначение – обеспечение моделей экосистемы информацией об абиотических факторах водной среды. Эта модель названа климатической гидротермодинамической моделью (КГТДМ), или CHTDM (Climatic Hydro Dynamic Model). С ее помощью воспроизведены климатические циркуляции Ладожского и Онежского озер [30–34]. Модель позволяет проводить расчеты распространения пассивных и неконсервативных примесей. В работе [33] приведены результаты расчетов распространения загрязнений в Онежском озере.

Для оценки изменений в экосистеме озер под воздействием меняющихся климатических условий на водосборе озера воспроизводится соответствующий гидротермодинамический режим озера. Изменения климата на водосборе задавались по сценариям IPCC и рассчитывались на модели ECHAM-4, разработанной в Институте Макса Планка до 2050–2100 гг. [см. 50]. В моделях, разработанных Л.А. Руховцем и др. [33], изменения климата на водосборе озера определяют изменения теплового потока через поверхность водоема и суммарного притока воды, причем авторы изменяли эти внешние воздействия на водоем при моделировании. Были выполнены расчеты для нескольких типов термогидродинамики циркуляции вод и температурного режима Ладожского и Онежского озер для разных сценариев изменений климата, стока рек (среднемноголетнего, многоводного и маловодных периодов). Эксперименты с «холодной» циркуляцией (возможное похолодание климата) проводятся ввиду того, что в последнее десятилетие отмечается замедление потепления и, возможно, похолодание климата.

Результаты расчетов изменений термогидродинамики Ладожского и Онежского озер показали, что увеличение среднегодовой, среднемноголетней температуры водного тела озера к 2050 г. увеличится на 0,6 °С, тогда как для теплой циркуляции при потеплении климата на водосборе озера возрастет не менее чем на 1,4 °С. На рис. 2 сопоставлены кривые, характеризующие изменение площади ледяного покрова для всех пяти типов циркуляций. В расчетах воспроизведен ледовый режим водоема. При этом сроки образования и таяния льда близки к средним многолетним. Для Ладожского озера недостатком результатов численного моделирования является ежегодное 100 %-е покрытие озера льдом даже при потеплении климата [75].

Изменения в ледовом режиме вполне ожидаемые: для теплой циркуляции с повышенным притоком продолжительность полного ледостава наименьшая, для холодной циркуляции – наибольшая. Сопоставление поверхностного распределения температуры в летний период для различных циркуляций показывает, что наибольшие отличия есть в распределении температуры для холодной циркуляции и теплой с повышенным притоком. Отличия же для теплой циркуляции и теплой с пониженным притоком менее значительны. Такие же комментарии относятся к распределению температуры на вертикальном продольном разрезе.

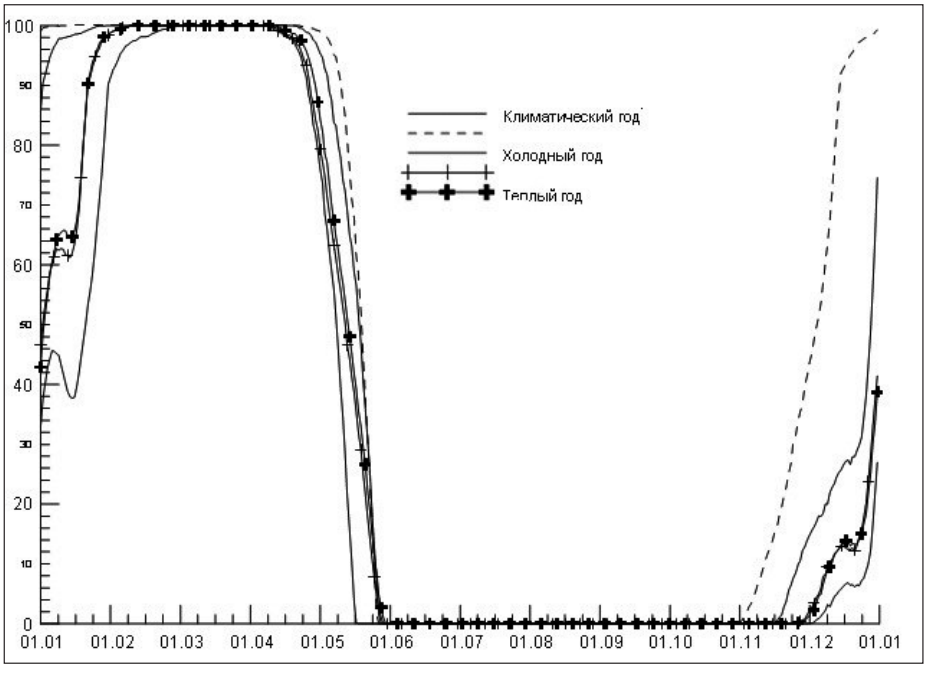

Рис. 2. Площадь (%) ледяного покрова Онежского озера (результаты моделировании для среднемноголетнего [климатическая], холодного года и потепления климата на водосборе до 2 °С) [33]

По результатам моделирования, описанных в работах [18, 19, 30–34, 43–45], были сделаны также следующие выводы о реакции термогидродинамики Ладожского и Онежского озер на изменения климата:

• При существенном потеплении климата в регионе до 2 °С гомотермия в весенний период исчезает на 10 дней раньше, термобар формируется на 20 дней раньше.

• Смещаются сроки образования ледяного покрова, озеро полностью покрывается льдом в первой половине февраля, тогда как для климатической циркуляции по данным наблюдений это явление отмечается в конце декабря – начале января.

• Осенний термический бар на поверхности озера для теплой циркуляции в результатах расчетов не проявляется.

• Измерения и моделирование крупномасштабных течений в Онежском и Ладожском озерах свидетельствуют о доминировании так называемой общеозерной циклонической циркуляции с наличием нескольких мезомасштабных (существенно меньших по размерам общеозерной) циклонических и антициклонических круговоротов, которые тесно связаны с батиметрией и бароклинностью.

• При более теплом климате с относительно коротким временем существования ледяного покрова скорости течений в зимний период в озерах возрастают за счет дополнительного воздействия поля ветра. Такой тип циркуляции вод

в зимний период является типичным для американских Великих озер [59], расположенных в более теплом климате, чем Ладожское и Онежское озера.

• Расхождения «климатической» (осредненной за много лет) циркуляции вод озера с циркуляциями, типичными для более теплого и более холодного климата, оказались для Онежского озера незначительны, наиболее существенные отличия отмечаются только в осенний период.

• Онежское озеро за всю историю измерений ледяного покрова около 100 лет всегда покрывается ледяным покровом разной толщины (от 20 см до 1,5 м), в то время как Ладожское озеро редко полностью покрывается льдом [14, 47]. Важным практическим результатом проведенных вычислительных экспериментов является то, что характер циркуляции вод, как при потеплении, так и при похолодании климата, не будет иметь принципиальных отличий.

Математическая формулировка моделей экосистем озер. Примером согласованных моделей гидротермодинамики и экосистемы может служить разработанный в СПб ЭМИ РАН комплекс моделей экосистемы Ладожского озера (КМЭЛО), или DEMLL (Dynamic Ecosystem Models of Lake Ladoga), и модель экосистемы Онежского озера (МЭОО), или DEMLO (Dynamic Ecosystem Model of Lake Onego). Выполнение в этих моделях законов сохранения обеспечено технологией построения дискретных моделей [2, 30–34]. Состояние экосистемы в этих моделях, разработанных в СПб ЭМИ РАН [2, 18, 19], описывается трехмерными полями концентраций следующих субстанций: растворенного в воде минерального фосфора ($P_{\min}$); девяти комплексов фитопланктона ($Ph1$, $Ph2$, …, $Ph9$); зоопланктона (Z); детритного фосфора (DP); растворенного в воде органического вещества (DOP); растворенного в воде кислорода (OX). В модели воспроизводятся следующие процессы: перенос субстанций течениями, турбулентная диффузия и оседание субстанций, трансформация живого и мертвого органического вещества и биогенов.

Система уравнений модели имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+v\frac{\partial C}{\partial y}+\left(w-w_c\right)\frac{\partial C}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)+L_C,$$

$$C=Ph1,\ Ph2,\ldots,\ Ph9,\ Z,\ DP,\ P,\ DOP,\ OX.$$

Здесь L_C – нелинейные операторы, описывающие процессы биохимической трансформации субстанций; u, v, w – проекции вектора скорости течения воды, являющиеся функциями от пространственных переменных (x, y, z) и времени t; (0, 0, w_c) – скорость оседания субстанций ($w_c > 0$); ν_x, ν_y, ν_z – коэффициенты турбулентной диффузии субстанций. При моделировании использовались результаты расчетов скоростей течений и температуры по моделям гидротермодинамики [2].

Ввиду того что фосфор – основной регулятор продуктивности экосистемы, авторам удалось построить модель функционирования экосистемы, как и несколько других моделей Ладожского озера [17, 27], в виде внутриводоемного круговорота фосфора. Это позволило существенно сократить число переменных в модели. В модели фосфор (P_{total}) поступает в озеро со стоком втекающих рек, с осадками

и из береговых источников. Следует подчеркнуть, что в рамках модели выполняется закон сохранения общего фосфора (P_{total}). Для Ладожского и Онежского озер в СПб ЭМИ РАН разработаны следующие трехмерные модели, воспроизводящие круглогодичное функционирование экосистемы озера:

– модель гидротермодинамики озера; воспроизводит круглогодичную циркуляцию озера (систему течений и температурный режим) (1987;1998–2003);
– модель, основанная на круговороте азота и фосфора (1992);
– базовая модель, основанная на круговороте фосфора (1998);
– модель, имеющая три трофических уровня (1998);
– модель, включающая в себя зообентос (2003);
– модель сукцессии фитопланктона (2003);
– комплексная модель экосистемы озера (2008);
– модернизированная модель сукцессии (2010);
– модель с организмами-деструкторами (2012).

Вычислительные эксперименты в [2, 30–34, 89] по воспроизведению функционирования озера с 1962 по 2005 г. показали, что для периода 1962–1995 гг. модель адекватно воспроизводит трансформацию экосистемы озера. Однако, как представлено на рис. 3, максимальные значения биомассы фитопланктона в эпилимнионе Ладоги в 2000 и 2005 гг. (более 2,00 мг/л) на 20 % меньше, чем в 1990 г. (около 2,5 мг/л).

С помощью математического моделирования получены количественные оценки, подтверждающие, что снижение фосфорной нагрузки не может гарантировать

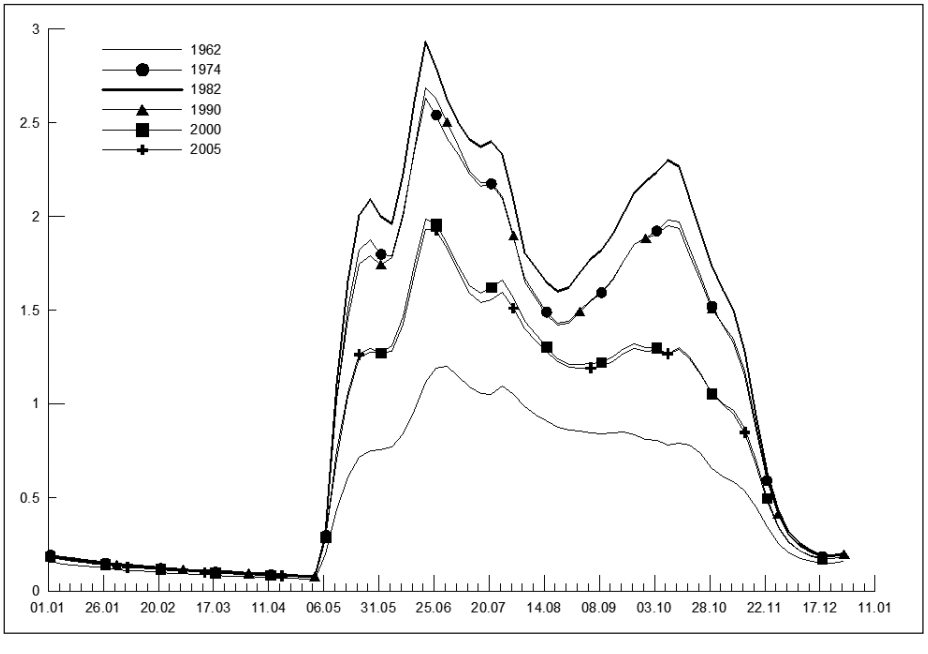

Рис. 3. Годовая динамика суммарной биомассы фитопланктона (мг/л) в эпилимнионе Ладожского озера (результаты моделирования) [21]

снижение продуктивности Ладожского озера. Фактически можно констатировать, что снижение фосфорной нагрузки до уровня 2430 т *P*/год не позволяет вернуть озеро в исходное олиготрофное состояние. Здесь, конечно, следует сделать оговорку: если не произойдут непредсказуемые изменения в структуре экосистемы озера. Этот пример показывает, что по крайней мере для великих озер умеренных широт снижение антропогенной нагрузки не может гарантировать возврата экосистем озер в устойчивое состояние. Тем самым можно рассматривать этот пример как предупреждение об опасности выведения экосистем озер из равновесного состояния.

Был сделан вывод о том, что трансформация экосистемы Ладожского и Онежского озер не связана с изменениями климата, а наибольший вклад в изменения экосистем рассматриваемых озер в настоящее время вносит деятельность человека.

Далее обратимся к нерешенным проблемам озера-водохранилища Байкал, которые, на наш взгляд, в первую очередь связаны с отсутствием системного эколого-социо-экономического [21] подхода по исследованию водоема и водосбора; разрозненности усилий разных научных организаций из-за недостаточной координации работ; несовершенством существующей системы мониторинга; отсутствием интегрированных систем управления водопользованием этого водоема, основанных на данных и знаниях и на соответствующих математических моделях. В работе [3] отмечается, что «При соблюдении приоритета сохранения уникальной экосистемы Байкала должен использоваться комплексный подход... Объектом исследований и согласований должны стать не только вопросы регулирования уровня озера, но и эффективное функционирование и развитие единой природно-технической и социально-экономической системы». Таким образом, ключевым фактором в решении проблем озера является неиспользование системного подхода и соответствующих математических моделей «озеро – водосбор», наподобие тех, что были разработаны и использовались для диагноза и прогноза экосистем Ладожского и Онежского озер [3, 30–34]. Основа для разработки и внедрения таких моделей для оз. Байкал имеется: Е.А. Цветовой [53] созданы трехмерные модели термогидродинамики и выполнены теоретические разработки для моделирования экосистемы озера [10, 17]. Таким образом, необходима координация исследований и практических разработок на основе федеральной комплексной программы научных исследований, которая позволит консолидировать усилия разных организаций, устранит ведомственную монополию на научно-техническую информацию о состоянии озерной экосистемы и водосбора и даст возможность создать интегрированную систему управления «озеро – водосбор».

Как показала практика последних десятилетий, реализация такой программы будет успешной при координации работ Российской академией наук, а не ведомствами. Пример этому – положительный опыт решения подобных крупных проблем в области озероведения в СССР. Например таких, как Программа «Большие озера СССР» или Севанская проблема, реализация которых выполнялась по постановлениям Государственного комитета СССР по науке и технике при СМ СССР. Для реализации этих проектов были созданы соответствующие координационные советы и по результатам исследований под руководством ИНОЗ АН СССР

и организаций-соисполнителей проведены комплексные исследования, разработаны модели, на основе которых были приняты соответствующие практические решения [28]. Среди важнейших проблем, которые предстоит решить, – понимание причин медленного восстановления экосистем крупных озер Евразии после резкого уменьшения биогенной нагрузки, оценка роли бактериопланктона и водных грибов в восстановлении экосистем озер, изучение роли вселенцев в изменении экосистем озер, совершенствование законодательства для охраны и рационального использования озер.

Расчеты на моделях, разработанных в СПб ЭМИ РАН при участии коллективов сотрудников ИНОЗ РАН и ИВПС [2, 21, 30–36], показали следующее:

• На основе модельных и натурных экспериментов получено, что при климатических воздействиях изменения гидротермодинамического режима Онежского озера более существенны, чем для Ладожского. В соответствии с этим реакция биоты (рассмотрены как биомассы, так и отдельные таксоны фитопланктона и зоопланктона) на климатические изменения для Онежского озера также более существенна. Общая биомасса фитопланктона при потеплении может не только увеличиться, но и, наоборот, снижаться. Это объясняется также тем, что наибольший вклад в биомассу дают водоросли, для которых более низкие температуры воды летом и осенью являются более благоприятными, например *Aulacosira islandica*, которая дает главный вклад в биомассу фитопланктона и развивается только при температуре воды, не превышающей 8 °С.

• Полученные в вычислительных экспериментах оценки возможных изменений в экосистемах Ладожского и Онежского озер показывают, что изменения в годовой динамике биомассы фитопланктона (основного продуцента в экосистеме) при возможных изменениях климата заметны только в осенний период, и эти изменения незначительны. Реакция зоопланктона на изменение температурного режима озер более заметна, чем у фитопланктона, и она имеет место в течение всего вегетационного периода. Существенно более значимой является реакция экосистем озер на изменения антропогенной нагрузки, которая является основным фактором, определяющим устойчивое состояние экосистемы озера.

• Для великих озер Европы (Ладожского и Онежского) в настоящее время, как и ранее, более заметной является реакция экосистемы озер на колебания антропогенной нагрузки, чем на изменения климата.

Важно то, что созданные в СПб ЭМИ РАН модели являются авторскими и работают только в «руках» создателей. Кроме этого созданные в СПб ЭМИ РАН модели имеют ряд недостатков, которые без основного разработчика Л.А. Руховца не удастся устранить. Среди «слабостей» моделей СПб ЭМИ РАН отметим: а) недостаточную развитость атмосферного блока, слабое описывание ледяного покрова, малое пространственное разрешение модели (2 км), невозможность задания изменчивого во времени притока рек; б) недоведенность моделей до стадии «продукта», который распространяется в виде кода, как модели POM, ECOM, ELCOM, EFDC, CANDIA NEMO, которые использовались для моделирования экосистем Великих американских озер [59, 61, 85].

Однако указанные модели также имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение для Ладожского и Онежского озер или озера Байкал. В работе

[93] приведено сравнение использования моделей NEMO, POM [60, 63, 78, 81, 82], а в работах [71, 77, 88, 92] приводится опыт использования моделей CANDIA, CAEDYM для озер. В модели CANDIA, в отличие от POM и NEMO, используется приближение «жесткой крышки». Для воспроизведения циркуляции и температурного режима озер Эри и Онтарио были проведены расчеты по этим трем моделям. Сопоставление результатов моделирования по всем трем моделям с данными наблюдений показало, что наименьшие отклонения (погрешности) температуры поверхности озер, средней температуры приповерхностного слоя глубиной 50 м от данных наблюдений и отклонения значений скоростей на выбранном наборе станций наблюдений оказались для модели NEMO, однако слабым местом данной модели оказалось воспроизведение термоклина для оз. Эри.

Для прогнозирования изменения экосистем озер и морей разработано много разнообразных моделей. Наличие большого числа и разнообразие моделей экосистем озер объясняется тем, что даже при сходстве абиотических условий и общности основных механизмов функционирования экосистем озер приоритетность механизмов зачастую различается и потому требуется создание собственных моделей для уникальных экосистем крупных озер. Среди задач, стоящих перед океанологией и лимнологией в XXI в., – создание теории динамики экологических систем, способной к практическому прогнозированию не только в обычных, но и в экстремальных ситуациях. Такой подход существенно меняет отношение к материалу наблюдений, мониторингу и моделированию [19, 61, 79, 85].

Комплекс моделей экосистем озер представляет собой детерминированные системы, построенные на основе законов сохранения вещества и энергии. Подобная парадигма в гидродинамической и термической частях модели основывается на численном решении уравнений Навье–Стокса, а в биологической – на уравнениях продукционной гидробиологии [1]. Подобный подход оказался результативным при изучении антропогенного эвтрофирования экосистемы озера. Однако при переходе к проблеме комплексного использования природных ресурсов озер и водохранилищ, включающих в себя не только сохранение или восстановление качества воды, но и использование их для водного транспорта, туризма, рыбного хозяйства, электроэнергетики, такой подход оказался недостаточным.

В этом случае предлагается новый подход [22, 23], позволяющий моделировать сложные нелинейные природные процессы, включая процессы самоорганизации, используя так называемые клеточные автоматы [57, 85] для создания компьютерной модели распространения консервативной примеси, оценки загрязнения водоема и термического режима Ладожского и Онежского озер. Задачи моделирования решаются по пути их последовательного усложнения: от точечной по вертикали модели глубоководного района озера к двумерной для продольного разреза озера и наконец к трехмерной модели всего водоема. Достоинство предлагаемого метода моделирования, в частности, заключается в простоте программной реализации. Аппарат клеточных автоматов хорошо приспособлен для описания гидрохимических и гидробиологических процессов, происходящих в озерах. Собственно, своим появлением клеточные автоматы обязаны задаче моделирования систем, способных к самовоспроизведению [57]. Это открывает перспективы расширения гидродинамических моделей на всю экологическую систему водоема.

Учитывая недостатки комплекса моделей, разработанных в СПб ЭМИ РАН, а также невозможность их применения без участия создателей этого комплекса в рамках гранта, в рамках гранта РНФ 14-17-00740 была поставлена задача разработки более совершенного комплекса моделей термогидродинамики (ТГД) и экосистем. Такая задача решается на основе ранее разработанной членом-корреспондентом РАН Р.А. Ибраевым модели ТГД для Каспия [12].

На рис. 4 приведена схема решения поставленных в проекте задач несколькими организациями.

В настоящее время в рамках проекта адаптирована трехмерная модель термогидродинамики озер с заданием атмосферных воздействий из нескольких моделей реанализа [11]. Используется более совершенный блок для описания ледяного покрова, сеточная область для численных экспериментов достигает 0,5 км, что позволяет более корректно описывать процессы в заливах и прибрежной зоне. Расчеты проводятся на вычислительных кластерах, что позволяет более корректно описать термогидродинамические процессы в озерах – апвеллинги, фронтальные зоны, термобар, а также процессы в прибрежной зоне озер. Созданная и апробированная модель экосистемы озера будет откалибрована и верифицирована на примере Ладожского и Онежского озер и в перспективе станет использоваться для диагноза и прогноза изменений экосистемы озера Байкал и других озер России.

Для начала на ее основе планируется создание системы поддержки принятия управленческих решений на примере Онежского озера-водохранилища с перспективой применения для озера Байкал – Иркутского водохранилища. Создание такой системы позволит отказаться от принятия малообоснованных управленческих решений без строго научного обоснования.

Проблемы оценки изменений климата и экосистем Белого моря и пути их решения. Белое море – одно из наиболее изученных морей России, на примере которого можно продемонстрировать пути решения ряда научных и практических проблем, задач по освоению Арктической зоны РФ [42, 46]. Площадь водосбора Белого моря (720 тыс. км^2) в 8 раз превышает площадь акватории моря (91 тыс. км^2), что является наибольшим показателем для всех окраинных морей Северного Ледовитого океана и свидетельствует о значительном влиянии процессов на водосборе на экосистемы моря [50], поэтому при проведении комплексных, системных исследований, изучении причин изменений экосистем моря при антропогенных и климатических воздействиях необходимо учитывать влияние водосбора. Проблемам Белого моря и его водосбора в последние 30 лет были посвящены работы [9, 64], в которых рассматривались разные аспекты оценки состояния моря, особенности его продуктивности, загрязнения, пути рационального использования ресурсов Беломорья. Современные проблемы Белого моря и водосбора в рамках программы освоения Арктической зоны РФ включают в себя широкий комплекс возникших проблем социо-эколого-экономического развития [42], решить которые без новых исследований будет невозможно.

Учитывая особенности термогидродинамики Белого моря, наличие сильных индуцированных приливных волн, малоизученный экспериментально водообмен между Баренцевым и Белым морями, требуется разработка моделей ТГД и экосистем для климатического масштаба и постановка соответствующих систем

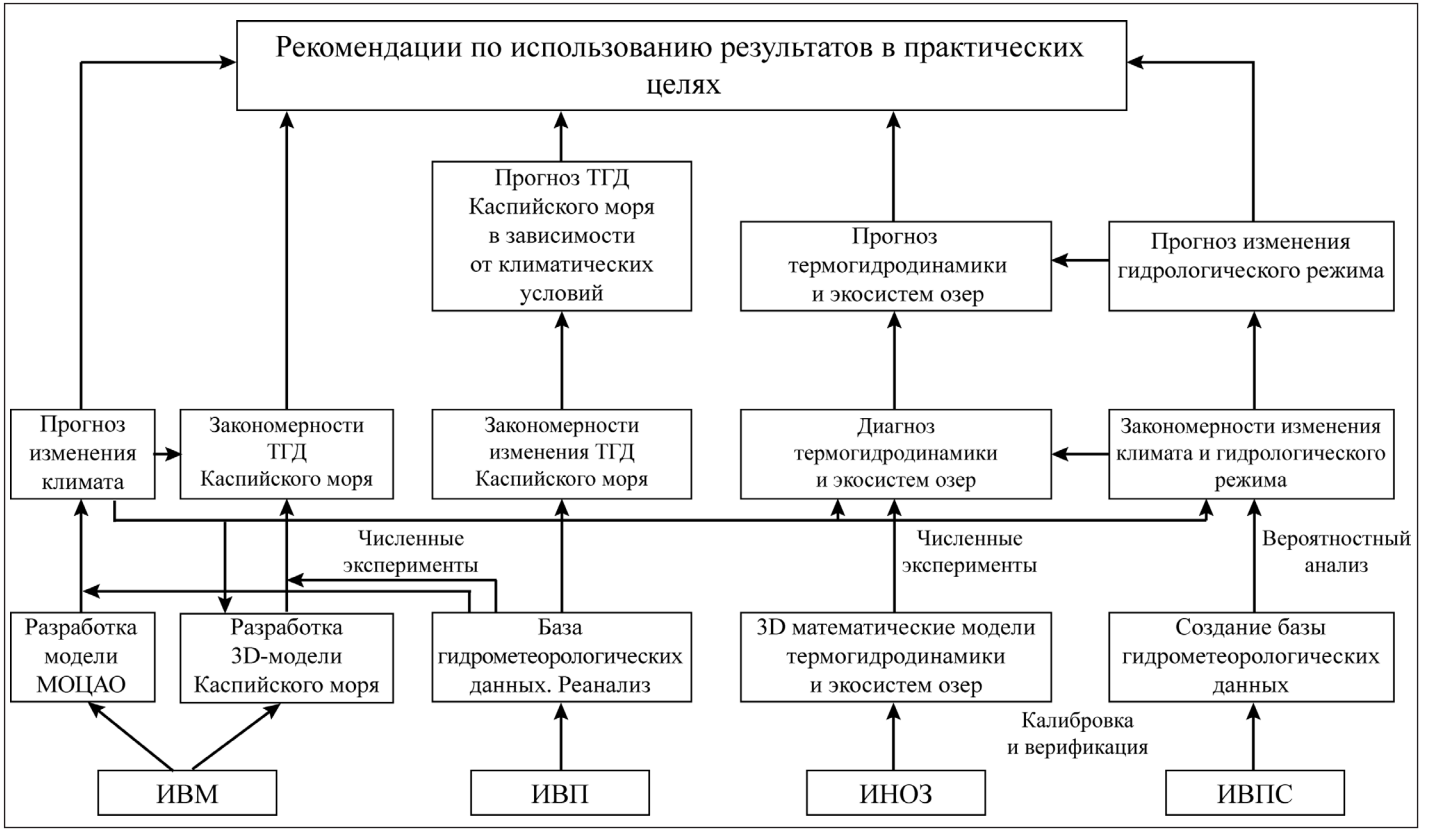

Рис. 4. Пример реализации задач диагноза и прогноза изменения гидрологического режима и экосистем крупных озер под влиянием антропогенных факторов и климата организациями ИВПС, ИВП, ИВМ, ИНОЗ РАН

наблюдений, в особенности в Горле Белого моря и на границе с Баренцевым морем.

Для описания изменений экосистемы Белого моря имеется несколько моделей, созданных в основном И.А. Нееловым и О.П. Савчуком [см. 50], верификация и калибрация которых выполнялась по БД, разработанной в ИВПС КарНЦ РАН на основе данных, полученных многими организациями. Модель ТГД И.А. Неелова (ААНИИ) описывает все основные физические процессы, ответственные за формирование гидрологических полей Белого моря (дрейфующий лед, приливы) и соединена с экосистемной моделью. При этом созданные модели являются авторскими для Ладожского и Онежского озер. В моделях экосистем, разработанных в СПб ЭМИ РАН [50], имелись недостатки задания атмосферных воздействий, моделирования ледяного покрова, параметризации подсеточных процессов [50]. Поэтому в 2005 г. академиком В.П. Дымниковым была поставлена задача создания более совершенной модели, собственного российского «продукта», который может использоваться разными пользователями.

Требовалось разработать 3D-модели для использования их в экспертных системах (ЭС), корректно поставить и организовать решение задач для оценки состояния и прогноза изменений экосистем морей, организовать дополнительные натурные эксперименты для калибрации, верификации моделей, разработать системы ассимиляции данных (САД) в математических моделях термогидродинамики в целях дальнейшего использования их в экспертных системах (ЭС) по оценке состояния и прогноза изменений морей и в конечном итоге создать собственный «продукт».

Предлагаемая ЭС может быть использована в задачах мониторинга, рационального использования и управления ресурсами морских и пресноводных объектов. Создание модели акад. В.П. Дымниковым было предложено на примере Белого моря, так как для этого бассейна создана достаточная информационная основа [46, 50], а также имеется ряд актуальных практических задач, которые могут быть решены с помощью предлагаемой экспертной системы.

Для решения этих задач в рамках нескольких проектов и программ, таких как ФЦП «Мировой океан», РФФИ совместно ИВПС КарНЦ РАН, ИВМ РАН и ИПМИ КарНЦ РАН в период 2005–2006 гг. было выполнено следующее:

– обобщены натурные данные по ТГД и химико-биологическим параметрам для использования их в моделях; создана, ежегодно обновляемая, комплексная БД «Белое море и водосбор» (2015) и издана обобщающая монография «Белое море и водосбор» (2007) [50];

– совместно ИВПС и ИО РАН выполнены эксперименты для калибрации, верификации и внедрения модели «Система оперативного мониторинга» (СОМ), разработанной Е.В. Семеновым с элементами усвоения данных спутниковых измерений [6];

– проведены специализированные эксперименты по изучению водообмена, течений через Горло, Соловецкие Салмы, в маргинальных фильтрах и др. [9, 50];

– для решения задач прогноза изменений экосистемы Белого моря под влиянием вариаций климата и антропогенных факторов была внедрена наиболее совершенная с точки зрения точности описания полей солености, температуры

воды, течений, ледяного покрова 3D-модель термогидродинамки FEMAO, разработанная для Северного Ледовитого океана в ИВМ РАН [см. 52].

Результаты и обсуждение задач осуществляются на сайте «Моделируем Белое море» (https://sites.google.com/site/modelingthewhitesea/home) [52]. В настоящее время после адаптации блока ТГД для Белого моря авторы выполняют калибрацию, настройку химико-биологического блока модели экосистемы моря – BFM (http://bfm-community.eu), функционирующей совместно с программным комплексом JASMINE [52], созданным специально для Белого моря на базе модели FEMAO. Модель BFM разработана итальянским консорциумом, объединяющим научные организации, занимающиеся климатом и океанографией: CMCC, OGS, UNIBO, UST (http://bfm-community.eu). Биогеохимическая модель BFM описывает динамику концентрации биогенных элементов и веществ в составе групп организмов (фито-, зоо- и бактериопланктон, детрит, органическое и неорганическое вещество и т. п.). Входными данными расчетной программы в комплексе JASMINE+BFM являются граничные условия на «жидкой границе» Белого и Баренцева морей, метеорологические данные NCEP (http://www.ncep.noaa.gov/), сток крупных рек задается из наблюдений. Учитываются потоки массы, тепла и соли. Калибрация и верификация модели осуществляется также по данным дистанционных спутниковых измерений. Выходные данные – среднемесячные поля трехмерных течений, термохалинные поля, отклонения уровня моря от равновесного, распределения массы льда, двумерной скорости дрейфа льда с учетом снега, сплоченность льда по градациям толщины. Выходные данные BFM – концентрации и распределения веществ. Качественное распределение скорости течений, термохалинных полей, толщины льда в общем согласуется с данными наблюдений, представленных в работах [50, 64]. Недостатком модели BFM для Белого моря является неопределенность многих химико-биологических параметров, измерение которых затруднено или вовсе невозможно для Белого моря. Преимуществом разработки модели экосистемы Белого моря является возможность постановки направленных экспериментов для получения ключевых параметров модели и проведение подспутниковых измерений для разработки алгоритмов оценки параметров качества вод.

Разработанную на примере Белого моря модель экосистемы для оценки влияния изменений климата и разнообразных антропогенных воздействий предполагается использовать в дальнейшем как для моделирования экосистем морей Северного Ледовитого океана, так и для крупных стратифицированных озер.

Заключение

Серьезной проблемой отечественной лимнологии и океанологии при решении крупных задач является отсутствие конкурирующих школ, коллективов – создателей математических моделей экосистем морей и крупных стратифицированных озер, как это было ранее. Например, можно вспомнить работы коллективов ВЦ, Москва (Н.Н. Моисеев), университета Ростова-на-Дону (А.Б. Горстко и др.), СПИИ РАН (В.В. Иванищев, В.В. Михайлов и др., 2005), СПб ЭМИ РАН (Л.А. Руховец), ВЦ, Новосибирск (В.В. Пененко, Е.А. Цветова) и др. Не создаются модели в виде «продуктов», подобных широко используемым в России NEMO, BFM,

POM и др. Разработанные для водных объектов России математические модели работают только в руках их создателей.

Успехи моделирования существенно зависят от способностей создателей модели понять и оценить самые главные черты и характеристики экосистемы, которые следует учитывать в рамках модели. Существенно препятствует исследованиям доступность данных, а также возможность постановки необходимых экспериментов ввиду слабой оснащенности многих научных организаций приборами, которые практически не разрабатываются в нашей стране, а также научно-исследовательскими судами нового поколения.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 14-17-00740-П.

Литература

1. *Алимов А.Ф.* Элементы теории функционирования водных экосистем. – СПб.: Наука, 2000. – 147 с.
2. *Моделирование* экосистем больших стратифицированных озер / Г.П. Астраханцев, В.В. Меншуткин, Н.А. Петрова, Л.А. Руховец. – СПб.: Наука, 2003. – 363 с.
3. *Бычков И.В., Никитин В.М.* Регулирование уровня озера Байкал // География и прир. ресурсы. 2015, № 3. – С. 5–16.
4. *Водный* баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / под ред. Е.С. Нестерова. – М.: Триада, 2016. – 378 с.
5. *Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В.* Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. – С. 379.
6. *Опыт* верификации оперативной модели мониторинга Белого моря в 2004–2008 гг. / Н. Волженский, А.А. Родионов, Е.В. Семенов и др. // Фунд. и прикл. гидрофизика. 2009. Т. 5. – С. 33–42.
7. *О прогнозе* многолетних изменений уровня воды крупных озер / Т.Ю. Выручалкина, Н.Н. Филатов, Н.А. Дианский, А.Н. Гусев // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2016, № 9. – С. 3–16.
8. *Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л.* Управление водными ресурсами. – М.: Научный мир, 2010. – 232 с.
9. *О проявлении* морского и речного факторов в фазы прилива и отлива на береговых участках разной конфигурации Белого моря / Ю.С. Долотов, Н.Н. Филатов, Н.А. Римский-Корсаков и др. // Океанология. 2011. Т. 51, № 1. – С. 110–122.
10. *Зилов Е.А.* Математическое моделирование экосистемы озера Байкал: вчера, сегодня, завтра // Изв. Самарского НЦ РАН. 2006. Т. 8. – С. 58–64.
11. *Моделирование* гидротермодинамики Ладожского озера / И.С. Зверев, К.В. Ушаков, Е.А. Шипунова и др. // Всерос. конф. по крупным внутренним водоемам (V Ладожский симпозиум). – СПб.: Изд-во «Лема», 2016. – С. 41–49.
12. *Ибраев Р.А.* Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. – М.: ГЕОС, 2008. – 130 с.
13. *Моделирование* абиотических процессов в системе «водосбор – водоем» (на примере Чудско-Псковского озера) / С.А. Кондратьев, С.Д. Голосов, И.С. Зверев и др. – СПб.: Нестор-история, 2010. – 104 с.
14. *Ладога* / под ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. – СПб.: Нестор-История, 2013. – 468 с.
15. *Малинин В.Н.* Проблема прогноза уровня Каспийского моря. – СПб.: РГГМУ, 1994. – 159 с.
16. *Математическое* моделирование общей циркуляции атмосферы и океана / Г.И. Марчук, В.П. Дымников, В.Б. Залесный и др. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 320 с.
17. *Меншуткин В.В.* Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). – Петрозаводск; СПб., 2010. – 419 с.
18. *Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 1. Гидродинамика озер // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. – С. 1–17.

19. *Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор). 2. Модели экосистем пресноводных озер // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. – С. 24–38.
20. *Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Математические модели водных экосистем в задачах управления ресурсами озер // Вод. хозяйство России. 2014, № 3. – С. 100–108.
21. *Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Состояние и перспективы развития моделирования экосистем пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов. – СПб.: Нестор-История, 2014. – 118 с.
22. *Меншуткин В.В., Филатов Н.Н.* Модель подледной экологической системы озера, основанная на применении клеточных автоматов // Тр. Карельского науч. центра РАН. Сер. Лимнология. 2016, № 5. – С. 76–87.
23. *Меншуткин В.В., Филатов Н.Н.* Модели Ладожского озера с использованием трехмерных клеточных автоматов // Тр. Карельского науч. центра РАН. Сер. Лимнология. 2017, № 3. – С. 93–102. – DOI: 10.17076/lim582.
24. *Монин А.С.* Введение в теорию климата. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 166 с.
25. *Панин Г.Н., Дианский Н.А.* О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 3. – С. 304–316.
26. *Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В*. Воздействие Северной Атлантики на гидрологический режим бассейна Каспийского моря // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42, № 4. – С. 442–452.
27. *Особенности* эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования / Н.А. Петрова, Т.Н. Петрова, О.М. Сусарева, И.В. Иофина // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. – С. 580–590.
28. *Природные* ресурсы больших озер СССР и вероятные их изменения / [Авт.-сост. И.М. Распопов, Н.Н. Давыдова, В.А. Кириллова и др.]; отв. ред. О.А. Алекин. – Л.: Наука, 1984. – 286 с.
29. *Румянцев В.А., Трапезников Ю.А.* Стохастические модели гидрологических процессов. – М.: Наука, 2008. – 152 с.
30. *Оценка* возможных изменений в экосистеме Ладожского озера в 21 веке под влиянием антропогенных и климатических факторов / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, Т.Р. Минина и др. // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33, № 3. – С. 367–382.
31. *Моделирование* климатической циркуляции Онежского озера / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, А.Н. Мальгин и др. // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33, № 5. – С. 555–566.
32. *Исследование* реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки / Руховец Л.А., Петрова Н.А., Меншуткин В.В. и др. // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38, № 6. – С. 740–752.
33. *Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Использование математических моделей для решения задач сохранения водных ресурсов Онежского озера // Тр. КарНЦ РАН. 2011, № 4. – С. 77–87.
34. *Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Озера и климат: модели и методы // Модели и методы в проблеме взаимодействия атмосферы и гидросферы: учеб. пос. / под ред. В.П. Дымникова, В.Н. Лыкосова, Е.П. Гордова. – Гл. 10. – Томск: ИД ТГУ, 2014. – С. 256–326.
35. *Ассимиляционный* потенциал водных систем и задача сохранения водных ресурсов / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, Т.Р. Минина и др. // Тр. конф. «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике». Секция гидрологии. – Цимлянск, 2012. – С. 311–317.
36. *Великие* озера Европы и глобальное потепление. II / Л.А. Руховец, Г.П. Астраханцев, Т.Р. Минина и др. // Обзор прикл. и промышл. математики. 2011. Т. 18. Вып. 5. – С. 712–728.
37. *Страшкраба М., Гнаук А.* Пресноводные экосистемы (математическое моделирование). – М.: Мир, 1989. – 374 с.
38. *Тихомиров А.И.* Термика крупных озер. – Л.: Наука, 1982. – 232 с.
39. *Тулохонов А.К., Гомбоев Б.О.* Байкальская природная территория: переход на устойчивое развитие. «Круглый стол» Совета Федерации «Байкал – мировое наследие». 16 июня 2003 г. – С. 39–41.
40. *Филатов Н.Н.* Гидродинамика озер. – СПб.: Наука, 1991. – 191 с.
41. *Филатов Н.Н.* Динамика озер. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 165 с.
42. *Филатов Н.Н., Дружинин П.В., Тержевик А.Ю.* Беломорье – регион для решения актуальных проблем Арктики // Арктика: экология и экономика. 2011, № 2. – С. 91–101.
43. *Реакция* озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата / Н.Н. Филатов, А.П. Георгиев, Т.В. Ефремова и др. // ДАН. 2012. Т. 444, № 5. – С. 1–4.

44. *Изменения* и изменчивость климата европейского севера России и их влияние на водные объекты / Н.Н. Филатов, Л.Е. Назарова, А.В. Семенов и др. // Арктика. 2012, № 2 (6). – С. 80–94.
45. *Влияние* изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России / Н.Н. Филатов, Л.А. Руховец, Л.Е. Назарова и др. // Учен. зап. РГГМУ. 2014, № 34. – С. 48–55.
46. *Создание* информационной системы и электронного атласа по состоянию и использованию ресурсов Белого моря и его водосбора / Н.Н. Филатов, А.В. Толстиков, М.С. Богданова и др. // Арктика: экология и экономика. 2014, № 3 (15). – С. 18–29.
47. *Филатов Н.Н. (отв. ред.),* Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Н.М. Калинкина, Т.П. Куликова, А.В. Литвиненко, П.А. Лозовик. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. – 375 с.
48. *Филатов Н.Н., Тержевик. А.Ю.* Совместный российско-швейцарский проект по исследованию зимнего режима Ладожского и Онежского озер // Тр. Карельского науч. центра РАН. Сер. Лимнология. 2015, № 5. – С. 86–89.
49. *Внутривековая* изменчивость уровня крупнейших озер России / Н.Н. Филатов, Т.Ю. Выручалкина, Н.А. Дианский и др. // Докл. АН. 2016. Т. 467, №. 5. – С. 589–593.
50. *Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю.* (ред.) Белое море и водосбор. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 335 с.
51. *Фролов А.В.* Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. – М.: Геос, 2003. – 170 с.
52. *Чернов И.А., Толстиков А.В., Яковлев Н.Г.* Комплексная модель Белого моря: гидротермодинамика вод и морского льда // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Математическое моделирование и информационные технологии. 2016, № 8. – С. 116–128.
53. *Цветова Е.А.* Математическое моделирование циркуляции вод озера. Течения в Байкале. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 63–81.
54. *Шимараев М.Н., Старыгина Л.Н.* Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // География и природные ресурсы. 2010, № 3. – С. 62–68.
55. *Adrian R.a, O'Reilly C., Horacio.* et *al*. Lakes as sentinels of climate change. Limnol. Oceanogr., 54 (6, part 2), 2009, 2283–2297.
56. *Angel J.R. and K.E. Kunkel*. The response of Great Lakes water levels to future climate scenarios with an emphasis on Lake Michigan-Huron. Journal of Great Lakes Research, Supplement 2, Vol. 36, 2009. 51–58.
57. *Atanasova N., Todorovski L., Džeroski S. and Kompare B*. Building a domain library for knowledge based approach to automated modeling of lakes // Proceeding of European Conference on Ecological Modelling. Bled. 2004. – P. 17–18.
58. *Appt J., Imberger J., Kobus H*. Basin-scale motion in stratified Upper Lake Constance // Limnol. Oceanogr. 2004. 49 (4). – P. 919–933.
59. *Beletsky D., Schwab D.J.* Climatological circulation in Lake Michigan // Geophys. Research Letters. V. 35 (L21604, doi:10.1029/2008GL035773): 2008. – P. 1–5.
60. *Blumberg A.F., Mellor G.L*. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-dimensional Coastal Ocean Models // J. Coastal Estuarine Sci. V. 4 (AGU Washington. D.C. / Ed. N.S. Heaps). 1987. – 208 p.
61. *Boegman L., Rao Y.R*. Process oriented modeling of Lake Ontario Hydrodynamics // Proc. 6th Intern. Sympos. Environ. Hydraulics. Athens, 2005. – 6 p.
62. *Corman J.R., McIntyre P.B., Kuboja B., Mbemba W., Fink D.C,. Wheeler W., Gans C., Michel E. and Flecker A.S*. Upwelling couples chemical and biological dynamics across the littoral and pelagic zones of Lake Tanganyika, East Africa. Limnol. Oceanogr., 55 (1), 2010, 214–224.
63. *Dupont F., Padala C., Anning H. et al*. A NEMO-based modelling system for the Great Lakes // 15th Workshop on Physical Processes in Natural Waters / Burlington, 2011. – P. 46–52.
64. *Filatov N., Bobilev L., PozdnjakovD. et al*. White Sea, Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change Springer Praxis Geophys. Sc. 2005. – 472 p.
65. *Filatov N., Terzevik A., Zdorovennov A., V.Vlasenko, N. Stashuk and K. Hutter.* Field studies of internal waves in Lakesof the Globe. In the book Strongly nonlinear Internal waves in lakes: Generation,

Transformation. Chapter 2. Advances in Geophysical and Environmental Mechanics (Springer Book Series). Springer. 2012. – P. 23–104.
66. *Golosov S., Terzhevik A., Zverev I. et al*. Climate change impact on thermal and oxygen regime of Shallow lakes // Tellus. 2012. V. 64. – P. 1–11.
67. *Gronewold A.D., Fortin V., Lofgren B., Clites A., Stow C.A., Quinn F.* Coasts, water levels, and climate change: A Great Lakes perspective // Climatic Change. 2013. 120: 697–711 – DOI: 10.1007/s10584-013-0840-2.
68. *Guidelines* of Lake Management, Principles of lake management. Eds. S. Jorhensen, R. Vollenveider. UNEP. 1988. – 195 p.
69. *Hawkins E., Edwards T., McNeall D*. Pause for thought // Nature Climate Change. 2014. V. 4. – P. 154–156. – DOI:10.1038/nclimate2150.
70. *Henderson-Sellers B., Markland H*. Decayng Lakes. John Wiley & Sons. Chichester, 1987. – 279 p.
71. *Hipsey M.R., Hamilton D.P*. Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model: CAEDYM // Science Manual. Centre for Water Research Report, University of Western Australia. 2008. V. 3. – P. 526–533.
72. *Hutter K., Wang Y., Chubarenko I*. Physics of Lakes, Volume 1: Foundation of the Mathematical and Physical Background, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. V. 1. 2011. – 434 p.
73. *Hutter K., Wang Y., Chubarenko I*. Physics of Lakes. Springer-Verlag; Berlin; Heidelberg, V. 2. 2011. – 646 p.
74. *Jorgensen S.E*. Overview of the model types available for development of ecological models // Ecol. Mod. V. 215. 2008. – P. 3–9.
75. *Kondratyev K.Ya. and Filatov N.N. (Eds.)* Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 1999. – 395 p.
76. *Laval B., Imberger J., Hodges B.R., Stocker R*. Modelling circulation in lakes: Spatial and temporal variations // Limnol. and Oceanogr. 2003. V. 48, № 3. – P. 983–994.
77. *Leon L.F., Lam D.C., Schertzer W.M. et al*. Towards coupling a 3D hydrodynamic lake model with Canadian Regional Climate Model: Simulation on Great Slave Lake // J. Environ. Modelling & Software. 2007. V. 22. Is. 6. – P. 787–796.
78. *Leon L.F., Smith R.E.H., Hipsey M.R. et al.* Application of a 3D hydrodynamicbiological model for seasonal and spatial dynamics of water quality and phytoplankton in Lake Erie // J. Great Lakes Research. 2011. V. 37, № 1. – P. 41–53.
79. *Livingstone D.M., Adrian R.L.* Regional and Supra-Regional Coherence in Limnological Variables. The impact of climate change on European lakes (Ed. by Glen George). (Aquatic ecology series; 4) – Dordrecht; Heidelberg: Springer, 2010. – P. 311–337.
80. *MacKay M.D., Neale P.J., Arp C.D.* Modeling lakes and reservoirs in the climate system. Limnol. Oceanogr., 54 (6, part 2), 2009, 2315–2329.
81. *Madec G. and the NEMO team*. NEMO ocean engine. Note duPˆoledemod´elisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No 27, ISSN No 1288-1619. version 3.4. 2012.
82. *Mellor G.L.* User`s guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Princeton University, Princeton. USA. 1996. – 39 p.
83. *Mellor G.L., Blumbrg A.F*. Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system // Mon. Wea. Rev. 1985. 113. – P. 1380–1383.
84. *Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al*. Implementation of the lake parametrisation scheme Flake into numerical weather prediction model COSMO // Boreal Environ. Research. 2010. 15. – P. 218–230.
85. *Mooij W.M., Trolle D., Jeppesen E. et al*. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modeling approach // Aquatic Ecology. 2010. 44 (3). – P. 633–667.
86. *Noges P., Kangur K., Noges T. et al.* Highlights of large lake research and management in Europe. In European Large Lakes: Ecosystem Changes and Their Ecological and socioeconomic impact. Developments in Hydrobiology. Dordrecht: Springer, 2008. – P. 259–276.
87. *Oveisy* A*., Boegman L., Imberger J*. Three-dimensional simulation of lake and ice dynamics during winter // Limnol. Oceanography. 2012. 57, 1. – P. 43–57.
88. *Omstedt A*. Process oriented numerical modeling in lakes, coastal seas and oceans. Univ. Gotheborg. http://wwwoceanclimate/PROBE_0_Part1.pdf., Part 2, Part 3. 2008.
89. *Rukhovets L., Filatov N. (ed.)* Ladoga and Onego – Great European Lakes. Observation and Modelling. Chichestre. UK. Springer-Praxis, 2010. – 302 p.

90. *Simons T.S*. Verification of numerical models of Lake Ontario: III. Long-term heat transports // J. Phys. Oceanogr., 1976. 6. – P. 372–378.
91. *Schindler D.W., Beaty K.G., Fee E.J., Cruikshank D.R., DeBruyn E.R., Findlay D.L., Linsey G.A., Shearer J.A., Stainton M.P. and Turner M.A*. (1990). Effects of Climate Warming on Lakes of the Central Boreal Forest. Science, 250 (4983), 967–970.
92. *Sheng J., Wright D., Greatbatch R., Dietrich D*. CANDIE: A new version of the DieCAST Ocean Circulation Model // J. Atm. and Oceanic Tech. 1998. 15. – P. 1414–1432.
93. *Surter B., Finstad A. G, Helland I. P, Zweimuller I.,Holker F.* The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. Aquatic Sciences. 08/2012; DOI:10.1007/s00027-012-0274-3.mn.
94. *Weitao Zhanga, Sue B. Watsona, Yerubandi R. Raoa, Hedy J. Klingc.* linked hydrodynamic, water quality and algal biomass model for alarge, multi-basin lake: A working management tool. Ecological Modelling 269 (2013). 37–50.
95. *Vollenweider R.A*. Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters with Special Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication. Technical Report DA5/SCI/68.27, Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, 1968. 250 p.
96. *Zilitinkevich S.S., Kreiman K.D., Terzhevik A.Yu*. The thermal bar // J. Fluid Mech. 1992. 236. –P. 27–42.
97. *Zepu Zhang, Dmitry Beletsky, David J. Schwab and Michael L. Stein*. Assimilation of current measurements into a circulation model of Lake Michigan W ATER RESOURCES RESEARCH. V. 43, W1. 1407. – 11 p. – DOI:10.1029/2006WR005818, 2007.

МОРСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 639.2.053.7(261+265.1)

К.В. Бандурин, А.Г. Архипов

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ОКЕАНИЧЕСКИХ РАЙОНАХ ИССЛЕДОВАНИЙ АТЛАНТНИРО

ФГБНУ «Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», bandurin@atlantniro.ru, arkhipov@atlantniro.ru

K.V. Bandurin, A.G. Arkhipov

MODERN STATE OF AQUATIC BIOLOGICAL RESOURCES IN THE OCEANIC RESEARCH AREAS OF ATLANTNIRO

В статье проведен анализ состояния водных биоресурсов в океанических районах исследований АтлантНИРО – Атлантическом и юго-восточной части Тихого (ЮВТО) океанов. Наибольший интерес для российского рыболовства представляет район Центрально-Восточной Атлантики (ЦВА). Запасы пелагических рыб в этом районе в целом находятся в относительно стабильном состоянии и позволяют вести эффективный промысел. Район Юго-Восточной Атлантики по своей биопродуктивности соизмерим с ЦВА, но доступ к биоресурсам затруднен жесткой позицией прибрежных стран в отношении иностранного промысла. Перспективными объектами океанического промысла в открытых районах Атлантики являются тунцы, кальмары и антарктический криль. Для присутствия отечественного промысла в ЮВТО в настоящее время требуется как углубленный анализ современных и ретроспективных научных данных, так и активная работа российских делегаций в региональной международной организации по управлению рыболовством. В целом обосновывается необходимость продолжения и активизации деятельности России в различных межгосударственных и международных комиссиях и организациях, регулирующих промысел биоресурсов.

Ключевые слова: *водные биологические ресурсы, Атлантический океан, юго-восточная часть Тихого океана, рыбохозяйственные исследования, возможный вылов, общий допустимый улов, рыболовный промысел.*

The paper presents the analysis of aquatic bioresources state in the oceanic research areas of AtlantNIRO – the Atlantic and South-East Pacific Oceans (SEPO). The Eastern-Central Atlantic (ECA) area is of particular interest to the Russian fishery. Generally, pelagic fish stocks in this area are relatively stable and allow carrying out efficient fishing. Bioproductivity of the South-East Atlantic area is comparable with the one of the Eastern-Central Atlantic, but access to bioresources is constrained by riparian countries' rigid position in relation to foreign vessels fishing. Perspective target species of oceanic fishing in the broad areas of the Atlantic are tuna, squid and Antarctic krill. Currently, presence of domestic fishing vessels in the SEPO requires both an advanced

analysis modern and retrospective scientific data and participation of the Russian delegations in the regional fisheries management organization. In general, the necessity of continuation and intensification of the Russian activities in various interstate and international commissions, and organizations regulating the fishing of bioresources is justified.

Keywords: *aquatic biological resources, Atlantic Ocean, South-East Pacific Ocean, fishery research, recommended catch, total allowable catch, fishery.*

Введение

Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (АтлантНИРО) – один из ведущих государственных научных центров России по изучению водных биологических ресурсов (ВБР). Важная область деятельности АтлантНИРО – комплексное изучение ВБР и среды их обитания, разработка мер по сохранению ВБР в районах действия международных и межгосударственных договоров РФ в области рыболовства и сохранения ВБР Атлантического океана, а также в открытых районах Атлантики и юго-восточной части Тихого океана (ЮВТО). Основные океанические районы исследований института охватывают акваторию Атлантического океана южнее 50° с.ш., включая его антарктическую часть и ЮВТО (рис. 1). Цель настоящей работы – провести анализ современного состояния ВБР в океанических районах исследований АтлантНИРО с учетом имеющихся ретроспективных данных и оценить возможности добычи ВБР отечественным рыбопромысловым флотом в этих районах.

Центрально-Восточная Атлантика

Промысловый район Центрально-Восточной Атлантики (ЦВА) по классификации ФАО располагается вдоль западного побережья Африки от Гибралтарского пролива до устья р. Конго, между параллелями 36° 00' с. ш. и 6° 00' ю. ш. (рис. 1). Прибрежные воды Северо-Западной Африки находятся в районе действия Канарского апвеллинга и характеризуются высокой биологической продуктивностью [6]. Отечественные рыбохозяйственные исследования в этом районе начались в 1957–1959 гг. Проведенные работы показали наличие богатой сырьевой базы для рыбного промысла, представленной массовыми стайными пелагическими и демерсальными рыбами, а также головоногими моллюсками и ракообразными.

В 1961–1962 гг. был начат регулярный траловый промысел среднетоннажными и крупнотоннажными судами, а в 1969 г. и кошельковый лов. В настоящее время районы отечественного промысла в ЦВА – это исключительные экономические зоны (ИЭЗ) Марокко, Мавритании, Сенегала и Гвинеи-Бисау. С 1992 г. российский промысел в ИЭЗ Марокко осуществляется на основе межправительственных соглашений, так же как и в районе Мавритании, где первое соглашение было заключено в 1974 г., сразу после введения правительством этой страны рыболовной зоны. ИЭЗ Марокко и Мавритании являются основными районами отечественного промысла в ЦВА.

В районе Сенегала, после установления в начале 70-х гг. прошлого века ИЭЗ, промысел был прекращен и вновь возобновился в 1991 г. В январе 2011 г. правительствами России и Сенегала было заключено Соглашение о сотрудничестве в области рыболовства однако условия работы флота в этом Соглашении

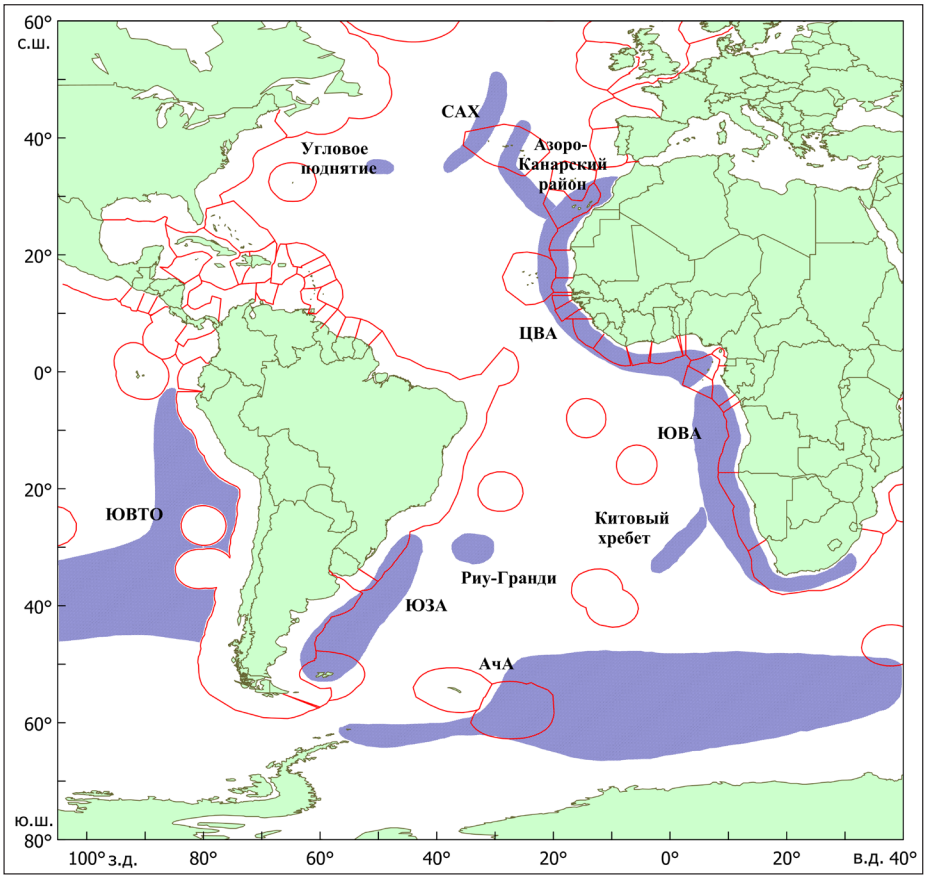

Рис. 1. Основные районы исследований АтлантНИРО
в Атлантическом океане и юго-восточной части Тихого океана

не определены. Согласно действующим в Сенегале правилам рыболовства, иностранные суда могут вести промысел только за пределами 20-мильной зоны на севере района и 35-мильной зоны на юге района. Поскольку основные скопления промысловых рыб обычно распределяются ближе к берегу, промысел при такой ширине запретной зоны малоэффективен. Соглашение о сотрудничестве в области рыболовства с правительством Гвинеи-Бисау заключено в апреле 2011 г., условия работы флота также не определены. В 2012–2016 гг. несколько траулеров России вели промысел в ИЭЗ Гвинеи-Бисау по коммерческим лицензиям. В более южных районах (Гвинея, Сьерра-Леоне и др.) после 1992 г. отечественного промысла практически не было [1, 8, 9].

Состояние запасов промысловых рыб. Основой сырьевой базой промысла в ЦВА являются запасы массовых пелагических рыб – европейской сардины, европейской и западноафриканской ставрид, каранкса, круглой и плоской сардинелл, восточной скумбрии и некоторых других видов. Динамика общего вылова

промысловых гидробионтов ЦВА представлена на рис. 2 [11]. Суммарный вылов ВБР всеми странами, ведущими промысел в этом районе, в последние годы был довольно стабильным и колебался в пределах 3,9–4,5 млн т. Наиболее значимые для промысла популяции рыб совершают сезонные миграции вдоль западноафриканского шельфа, перемещаясь между зонами прибрежных стран от Марокко на севере до Гвинеи-Бисау на юге [1, 8, 9]. Оценки запасов перечисленных рыб осуществляются Рабочей группой ФАО по мелким пелагическим рыбам Северо-Западной Африки.

Динамика запасов основных промысловых видов рыб в последние годы характеризуется следующими тенденциями. Популяция сардины испытывает периодические флюктуации численности, и в последние годы наблюдалась тенденция к ее снижению. Несмотря на это запас сардины остается на высоком уровне. Рекомендованный АтлантНИРО возможный вылов сардины на 2016 г. составил 492 тыс. т. Рабочая группа ФАО считает возможным увеличение вылова сардины, основная биомасса которой распределяется в марокканских водах. Запас скумбрии, по оценкам Рабочей группы, эксплуатируется полностью, несмотря на это он остается в стабильном состоянии, умеренно пополняется. Возможный вылов скумбрии, рекомендуемый Рабочей группой в последние годы, имеет тенденцию к увеличению. Так, в 2011 г. он оценивался величиной 200 тыс. т, а в 2016 г. – 330 тыс. т.

Запасы западноафриканской и европейской ставрид эксплуатируются чрезмерно, однако величина возможного вылова остается на достаточно постоянном уровне, суммарно на 2016 г. – 320 тыс. т. При определении возможного вылова круглой и плоской сардинелл Рабочая группа предлагает ориентироваться на нижний уровень расчетных величин; на 2016 г. рекомендована величина 490 тыс. т.

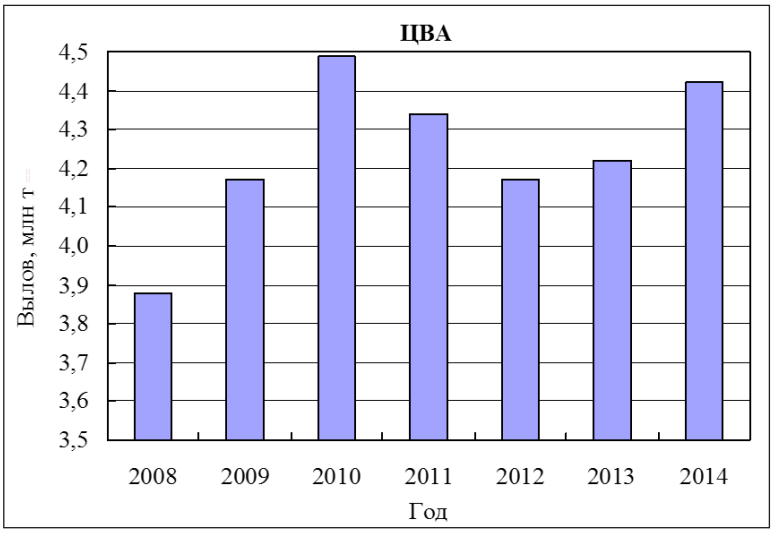

Рис. 2. Динамика общего вылова
промысловых гидробионтов в ЦВА (2008–2014 гг.)

Считается, что запасы сардинелл также переэксплуатируются, и рекомендуется снижение промыслового усилия на их облове.

Ежегодный вылов России в ЦВА (по межправительственным соглашениям в ИЭЗ иностранных государств) возможен в объеме 320–340 тыс. т.

Юго-Восточная Атлантика

По классификации ФАО границы Юго-Восточной Атлантики (ЮВА) определены в пределах 6–50° ю. ш. и 20° в. д. – 30° з. д. (см. рис. 1). Главным океанологическим фактором ЮВА, создающим условия для питания и размножения рыб, является Бенгельское течение – направленный на север поток относительно холодных вод, прослеживаемый на протяжении всего атлантического шельфа Южно-Африканской Республики (ЮАР), Намибии и южной части Анголы. Советский промысел начался здесь в 1961 г. Предпочтение отдавалось наиболее продуктивным участкам на шельфе Намибии, где облавливались ставрида, хек, сардинопс. Впоследствии, после распространения промысла в воды ЮАР и Анголы, увеличились и видовой состав, и общий вылов СССР. Его основу составляла капская ставрида [1, 8, 9].

До 1990 г. 200-мильные экономические зоны имели только ЮАР и Ангола. В намибийских водах регулированием промысла с 1969 г. занималась международная организация ИКСЕАФ, вырабатывавшая рекомендации относительно объемов вылова и параметров орудий лова. В настоящее время страны региона самостоятельно регулируют эксплуатацию запасов, с 2007 г. координируя свои усилия в рамках учрежденной ими Комиссии Бенгельского течения.

Состояние запасов. Динамика общего вылова промысловых гидробионтов ЮВА представлена на рис. 3 [11]. Суммарные уловы ВБР изменялись в пределах

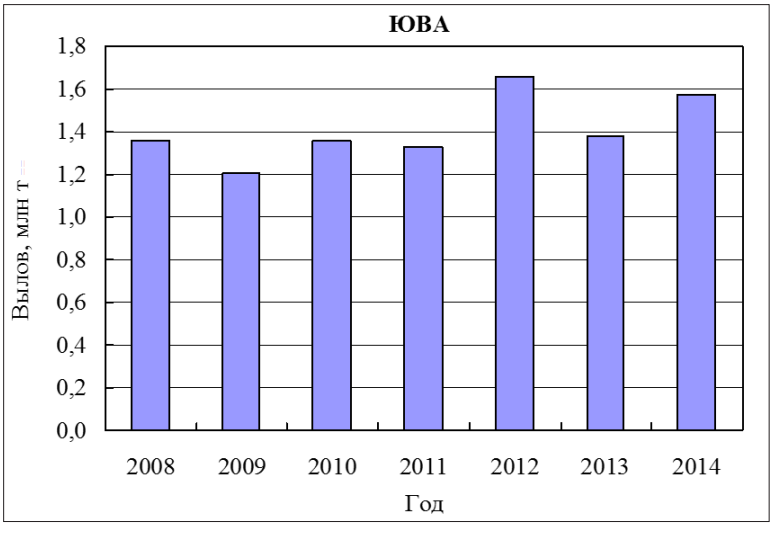

Рис. 3. Динамика общего вылова
промысловых гидробионтов в ЮВА (2008–2014 гг.)

1,2–1,7 млн т. Обитающие в прибрежных водах популяции анчоуса и сардинопса, представляющие интерес только для местного кошелькового лова, не только испытывают серьезное воздействие промысла, но и переживают существенные подъемы и спады численности по естественным причинам. Более стабильны запасы объектов тралового промысла, которые, однако, медленнее восстанавливаются после переловов.

Из трех встречающихся в регионе видов мерлуз важное промысловое значение имеют капский и глубоководный южноафриканский хеки. В настоящее время считается, что оптимальная величина ежегодного изъятия хеков составляет приблизительно 150 тыс. т. При расчетах возможного вылова исходят из принципа использования для промысла 80 % годового прироста биомассы.

Западноафриканская ставрида населяет ангольские воды, в теплое время года в небольшом количестве смещаясь на северные участки намибийского шельфа. Распределение капской ставриды, населяющей преимущественно ИЭЗ Намибии и ЮАР, на юге Анголы совпадает с участками, на которых, хотя и на других горизонтах, присутствуют скопления западноафриканской ставриды.

В последние годы запас западноафриканской ставриды эксплуатируется умеренно. Предполагается, что суммарный вылов ставрид в Анголе достигнет 360 тыс. т, но этого не будет достаточно для насыщения местного рынка. В Намибии же вылов капской ставриды превышает местные потребности. Траловый промысел этого вида никогда не приводил к оскудению ресурса, хотя величина вылова достигала 600 тыс. т в год. Причина устойчивости запаса состоит в раздельном обитании половозрелой рыбы и пополнения. Пополнение обитает над глубинами менее 200 м, где запрещена работа как ориентированным на придонный лов хека траулерам, так и более крупным судам разноглубинного лова, а половозрелая рыба образует скопления за пределами шельфа [1, 8, 9].

Ежегодно в ЮВА Россия в рамках совместных с прибрежными странами предприятий может добывать 250–270 тыс. т рыбы.

Юго-Западная Атлантика

Юго-Западная Атлантика (ЮЗА) – один из важнейших районов мирового рыболовства. В связи с протяженностью района от тропической зоны (5° с. ш.) до Субантарктики (60° ю. ш.) [см. рис. 1] здесь добывается широкий круг промысловых объектов, в первую очередь таких, как мерлузы, макруронус, путассу, корвина, сельдевые и горбылевые рыбы, нототения Рамсея, тунцы, креветки и кальмары [1, 8, 9]. Динамика общего вылова промысловых гидробионтов ЮЗА представлена на рис. 4 [11]. Ежегодные суммарные уловы морепродуктов в последние годы находились на уровне 1,7–2,5 млн т.

Аргентинский кальмар. В ЮЗА для отечественного промысла аргентинский кальмар был наиболее важным объектом. С 1982 по 2004 г. советская/российская флотилия траулеров вела его промысел с годовыми уловами 0,6–137,5 тыс. т. С 2005 г. российский промысел в ЮЗА не ведется. В то же время продолжается широкомасштабный интернациональный лов аргентинского кальмара в ИЭЗ Аргентины, Фолклендских островов и на участке свободного рыболовства между 41–47° ю. ш. за пределами ИЭЗ Аргентины. За исключением ряда лет с низкой

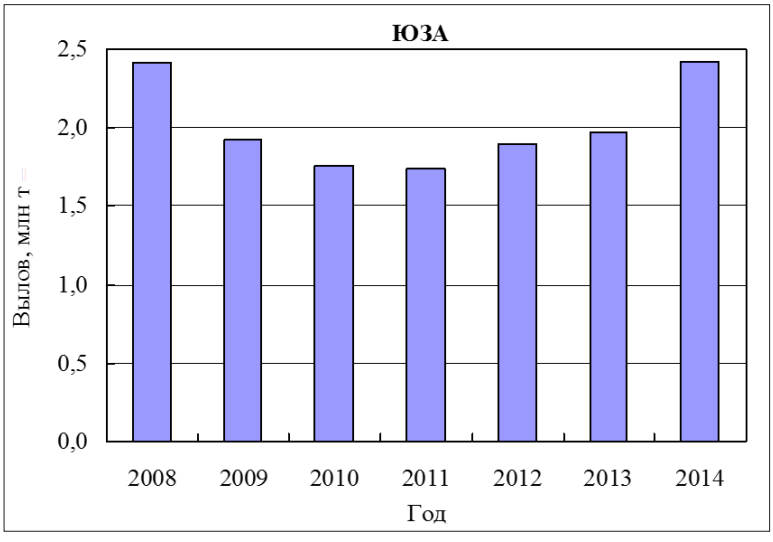

Рис. 4. Динамика общего вылова
промысловых гидробионтов в ЮЗА (2008–2014 гг.)

численностью, с 1987 г. в мировом промысле головоногих аргентинский кальмар является лидирующим видом по уровню годовых уловов, а в 1999 г. был получен рекордный вылов этого вида в истории промысла головоногих (1153,3 тыс. т, 32 % мирового вылова головоногих, или 45 % вылова морепродуктов в ЮЗА). В последнее десятилетие вылов этого вида колебался от 178,9 до 955,0 тыс. т, а его доля в общем вылове морепродуктов в ЮЗА соответственно изменялась от 10 до 38 %, в среднем составляя 21 %. Промысел аргентинского кальмара носит путинный характер и в основном длится с декабря–февраля по май–июнь. При одногодичном жизненном цикле величина запаса аргентинского кальмара подвержена значительным межгодовым и многолетним колебаниям [1, 7–9].

В конце 1990-х гг. запас кальмаров находился в хорошем состоянии. В 2003–2005 гг. произошел трехлетний спад его численности. С 2006 г. начался новый квазисемилетний цикл подъема обилия запаса кальмара с пиком в 2007–2008 гг. Но в середине подъема эта цикличность неожиданно нарушилась, в 2009–2012 гг. наблюдалось глубокое и затяжное падение запаса. В 2013 г. начался его новый выраженный подъем [7].

Рыбы. Основная часть запасов промысловых рыб в районе находится или в состоянии, близком к наибольшему уровню эксплуатации, или же в депрессивном состоянии. К последним относятся такие важные промысловые виды рыб, как аргентинская мерлуза и южная путассу [1, 8]. За последние годы их уловы снизились почти вдвое.

Около 90 % вылова рыб в районе приходится на ИЭЗ прибрежных государств. Наибольший их вылов отмечается в ИЭЗ Аргентины (около 520 тыс. т), Бразилии (около 490 тыс. т) и значительно меньший – в ИЭЗ Фолклендских островов (около 80 тыс. т) и Уругвая (около 50 тыс. т).

Несмотря на снижение численности главного промыслового вида – аргентинской мерлузы, ее вылов, вместе с незначительной долей чилийской мерлузы, продолжает занимать ведущее положение в структуре вылова рыб ЮЗА и составляет примерно 300 тыс. т. Следующая по значимости группа рыб – сельдевые, включая их основу – сардинелл. Они добываются, главным образом, у побережья Бразилии, где их вылов составляет немногим более 100 тыс. т. Близки по объему вылова к ним горбылевые рыбы (около 100 тыс. т). Среди них доминирует бразильская корвина (около 50 тыс. т), которая добывается на севере района у побережий Бразилии и Уругвая. В этих же районах вылавливается основная масса тунцов (более 30 тыс. т) и ариусов (около 30 тыс. т).

Величина вылова макруронуса значительно снизилась, но все же занимает заметное место в общем вылове (около 75 тыс. т). Еще более снизился улов путассу, составляя лишь около 10 тыс. т.

В целом величина вылова рыб в ЮЗА в последние годы стабилизировалась и колеблется в небольших пределах 1,3–1,6 млн т [1, 8].

Креветки. Общий вылов этих высокоценных объектов составляет примерно 140 тыс. т. Величина улова крупных креветок (пенеид) у побережья Бразилии в последние 10 лет достаточно стабильна, на уровне 20,0–40,0 тыс. т, в основном выше 30 тыс. т. В ИЭЗ Аргентины в 2013 г. был получен рекордный вылов красной аргентинской креветки, который достиг 104,8 тыс. т.

Следует подчеркнуть, что промысел биоресурсов в ЮЗА в последние годы идет на хорошем уровне с выловом, близким к 2 млн т. Уловы выше этой величины, как правило, получают лишь в годы очень высоких уловов аргентинского кальмара. Во многом именно колебания величины его уловов определяют изменчивость величины общих уловов морепродуктов в этом районе [1, 8].

Суммарный вылов России в ЮЗА может составить около 40 тыс. т.

Антарктическая часть Атлантики

Антарктическая часть Атлантики (АчА) расположена в водах так называемого Южного океана – южнее 50° ю. ш., в районе Фолклендских островов – южнее 60° ю. ш. (см. рис. 1).

Антарктический криль является главным промысловым ресурсом в водах Южного океана. По сочетанию потенциала вылова и потребительских свойств антарктический криль на сегодняшний день – крупнейший и самый перспективный ресурс Мирового океана. Динамика общего вылова промысловых гидробионтов АчА (в первую очередь – криля) представлена на рис. 5 [11].

Приоритет в разведке и изучении промысловых ресурсов криля и в их промышленном освоении принадлежит отечественным ученым и рыбакам. СССР приступил к комплексному изучению криля в 1961 г., а с 1971 г. начался его массовый промысел. В 1982 г. суммарный мировой вылов криля достиг рекордного уровня 528,7 тыс. т, причем вылов СССР составил 93 % (491,7 тыс. т). С 1986 по 1992 г. мировой промысел стабилизировался на уровне 300–400 тыс. т. Отечественный промысел криля прекратился с сезона 1992–1993 гг. и в небольших масштабах возобновлялся в 2009–2010 гг. с общим выловом 17,9 тыс. т.

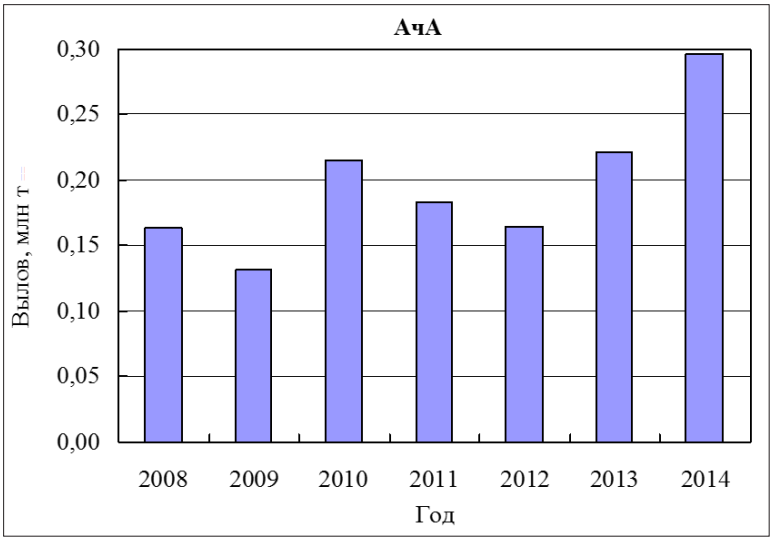

Рис. 5. Динамика общего вылова
промысловых гидробионтов в АчА (2008–2014 гг.)

После ухода с промысла судов СССР/России мировой вылов криля удерживался на уровне 90–120 тыс. т до 2006 г. В последние годы (2008–2016) наблюдается устойчивый рост годового вылова криля. Промысел ведут суда Норвегии (с 2006 г.), Республики Корея, Чили, Украины, Японии (до 2012 г.), Китая (с 2010 г.). Вылов, достигнутый в 2014 г. (около 300 тыс. т), является максимальным ежегодным выловом с 1992 г. (см. рис. 5). Более 90 % этого вылова приходится на долю «большой тройки» − Норвегии, Кореи и Китая.

Наблюдаемый рост вылова криля в последние годы в немалой степени связан с развитием норвежского промысла. Впервые Норвегия приступила к промыслу криля в 2006 г., имея годовой вылов 9,2 тыс. т. В последние годы на долю Норвегии приходится более 60 % годового вылова криля. Развитие норвежского промысла неотделимо от использования современной технологии непрерывного лова, позволяющей постоянно подавать криль на борт траулера, перекачивая его из тралового мешка непосредственно в процессе траления с помощью специальной насосной системы. На сегодняшний день промысел криля с использованием технологии непрерывного лова ведут только два судна под флагом Норвегии. Остальные суда – участники промысла (на международном промысле ежегодно работают до 13 судов) используют традиционную технологию тралового лова.

Весь современный промысел криля сосредоточен в АчА. В соответствии со сложившейся стратегией современного промысла основной вылов достигается в подрайоне Антарктического полуострова, где промысел ведется с января по начало июня, и в подрайоне Южных Оркнейских островов, где суда работают с январь по июнь – начало июля. После ухудшения ледовой обстановки в вышеназванных подрайонах суда перемещаются в подрайон острова Южная Георгия, где работают до середины сентября.

Анализ промысловой статистики, представленный в базе данных Комиссии по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (АНТКОМ), показывает, что величина стандартизированного индекса вылова на усилие (CPUE, т/ч) значительно варьирует по подрайонам и годам промысла. Однако в каждом из подрайонов средние величины CPUE, достигаемые на промысле криля при использовании традиционной технологии лова, были неизменно выше оценок CPUE, полученных при использовании технологии непрерывного лова. Среди судов, использующих технологию традиционного тралового лова (из Республики Корея, Японии, Польши, России, Украины, Китая), наиболее эффективно работали японские суда, которые применяли тактику прицельных тралений. В целом результаты анализа показывают, что пространственно-временная динамика распределения криля в АчА, сложившаяся в последние годы (с 2006 г.), позволяет добиваться эффективных тралений при использовании разных технологий тралового лова, обеспечивая необходимые суточные выловы с учетом требований и возможностей судовой переработки криля [12].

Общая биомасса криля в АчА оценивается значением 60,3 млн т. Величина общего допустимого вылова криля установлена на уровне 5,61 млн т при временном ограничении на вылов 620 тыс. т, введенном в 2007 г. в соответствии с предохранительным подходом. Данное ограничение на вылов будет действовать до тех пор, пока АНТКОМ не определит схему пространственного подразделения указанного общего допустимого вылова между мелкомасштабными единицами управления. При достигнутом вылове криль является крупнейшим недоиспользованным ресурсом как в водах Антарктики, так и в Мировом океане. Растущие объемы заявок на вылов криля, которые превышают достигнутый вылов, свидетельствуют об интересе целого ряда стран к промыслу криля и их желании заявить о своих претензиях на его ресурсы.

Развитие экспедиционного лова криля отечественными судами не ограничено ни правовыми возможностями российского рыболовства в водах Антарктики, ни мерами по сохранению морских живых ресурсов в зоне конвенции АНТКОМ, ни состоянием ресурсов криля. Также очень важным моментом является то, что плата, существующая за доступ к ресурсам криля, на порядок ниже по сравнению с другими промыслами за пределами ИЭЗ РФ, например на акваториях северо-западной и юго-западной Африки [1, 8, 9].

Ежегодный вылов России в зоне АчА за счет промысла криля возможен на уровне 5,6 млн т.

Запасы и промысел тунцов и близких к ним видов Россией в Атлантическом океане

Отечественный специализированный тунцеловный флот работал в Атлантическом океане с 1965 по 2009 г. Вылов СССР/Россией тунцов способами специализированного лова представлен на рис. 6 [1, 8].

Ярусный промысел тунцов велся до 1990 г. преимущественно в тропической части Атлантического океана за пределами 200-мильных зон. Основные объекты лова: большеглазый и желтоперый тунцы, меч-рыба, парусник, марлины, акулы. Годовой вылов не превышал 3,3 тыс. т.

Кошельковый лов практически завершен в 2000 г. Попытка его возобновления в 2006 г. была неудачной. В 2009 г. были получены последние уловы двумя сейнерами. Район промысла сейнеров – ЦВА, включая открытую часть океана и экономические зоны прибрежных африканских государств. Основные объекты лова: желтоперый и полосатый тунцы. Их годовой вылов достигал 8,7 тыс. т.

Кроме специализированного лова, тунцы присутствуют в траловых уловах как прилов при промысле мелких пелагических рыб (ставрид, сардины, скумбрии и др.) на шельфе стран Западной Африки, не превышая 1 % от общего вылова.

Максимальный отечественный вылов тунцовых специализированным флотом (кошельковый невод и ярус) составил 9,0 тыс. т в 1990 г. Кроме того, в качестве прилова тралами в этом же году было добыто 7,0 тыс. т тунцовых. После 2009 г. промысел тунцов Россией не ведется в связи с отсутствием специализированного флота.

В соответствии с Конвенцией полномочия ИККАТ (Международная комиссия по сохранению запасов атлантических тунцов) распространяются на все виды тунцов и близких к ним видов в зоне действия Конвенции. Это касается списка более 30 видов, который включает в себя тунцов и сопутствующих этому промыслу видов – мечерылых рыб, акул, макрелей, пеламиды.

Одним из наиболее рентабельных типов промысла тунцов является кошельковый. Он позволяет получить более 60 % мирового улова тунцов и считается наиболее эффективным способом лова. Основу уловов составляют тропические тунцы. Группа «тропические тунцы» включает в себя три вида тунцов – большеглазый, желтоперый и полосатый. Оценки состояния запасов этих видов выполняются Научным комитетом ИККАТ при участии всех стран – членов этой организации.

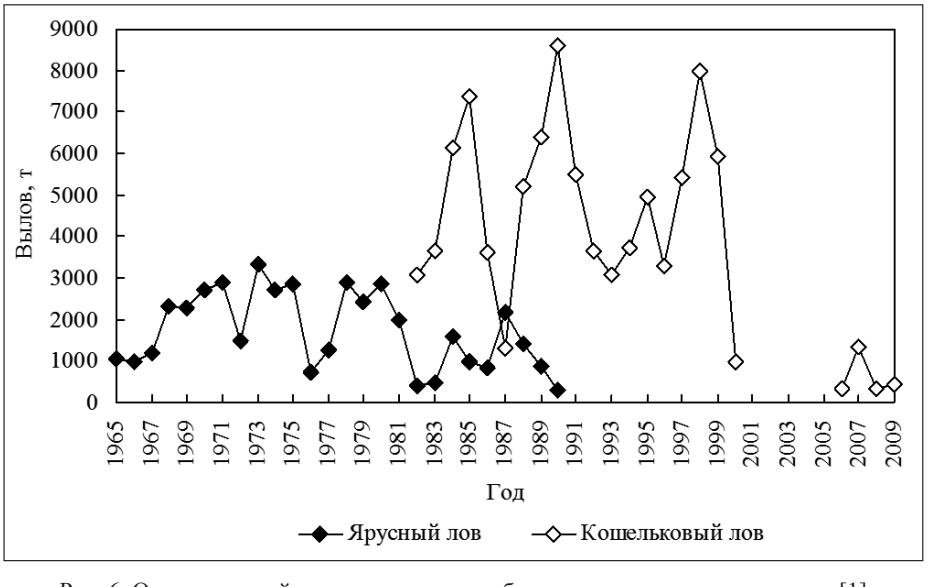

Рис. 6. Отечественный вылов тунцов способами специализированного лова [1]

Для желтоперого тунца установлен вылов для всех стран на уровне 110 тыс. т (квоты по странам отсутствуют).

Для полосатого тунца запаса Восточной Атлантики рекомендован вылов для всех стран на уровне максимального устойчивого вылова – 170 тыс. т, а для запаса Западной Атлантики – 36 тыс. т (вид не квотируется).

Для большеглазого тунца максимально устойчивый вылов для всех стран установлен на уровне 85,0 тыс. т, вид квотируется. Для России как страны, не ведущей специализированный лов, разрешен годовой вылов 2,1 тыс. т. В случае необходимости Россия имеет возможность запросить ИККАТ об увеличении квоты [13].

Ауксиды, пятнистый тунец, макрели и др. – лимитов вылова не имеют.

Принимая во внимание оценки возможного вылова и фактический годовой вылов, остаточный ресурс тунцов тропической группы в Атлантике составляет: желтоперого – 17,4 тыс. т, большеглазого – 21,9 тыс. т и полосатого – 40,5 тыс. т.

Несмотря на то что Россия не располагает действующими специализированными тунцеловными судами с 2010 г., российские траулеры ежегодно вылавливают в северной части Атлантического океана 1,5–3,5 тыс. т тунцовых рыб. Это сопутствующий прилов при траловом промысле мелких пелагических рыб в ИЭЗ прибрежных африканских государств [1, 8].

Данные оценок запасов «тропических тунцов» показывают, что возможно возобновление специализированного промысла тунцов Россией. При работе 6–9 тунцеловных сейнеров Россия получит ежегодный дополнительный вылов тунцов 20–25 тыс. т.

Подводные горы открытой части Атлантического океана

Освоение сырьевой базы океанических подводных гор и возвышенностей активно проводилось отечественным научным и рыболовным флотом в 70-е гг. прошлого столетия. Были выявлены и вовлечены в промысел запасы: тупорылого макруруса и берикса на подводных горах Срединно-Атлантического хребта (САХ); берикса в районе Углового поднятия; ставриды, скумбрии и берикса в Азорско-Канарском районе; берикса и рыбы-кабан в районах Китового хребта и подводной возвышенности Риу-Гранди (см. рис. 1).

В большинстве перечисленных районов в первые годы обнаружения промысловых скоплений промысел был успешным. В 1974–1975 гг. вылов макруруса в районе САХ достигал 15–30 тыс. т. В Южно-Азорском районе в 1973 г. суда СССР выловили 11,4 тыс. т ставриды и скумбрии. В районе Углового поднятия в 1976 г. было добыто около 10 тыс. т рыбы, в основном берикса, в этом же году в районе Китового хребта вылов составил около 6 тыс. т берикса и рыбы-кабан. Однако в последующие годы во всех исследуемых районах обычно наступал спад уловов. Это связано как с ограниченностью запасов, так и с изменчивостью поведения и распределения рыб на подводных горах. Относительно регулярным был только промысел макруруса в районе САХ, который с переменным успехом продолжался в 80-е и 90-е гг. прошлого столетия и в начале 2000-х гг. (до 2005 г.). В других районах промысел на подводных горах был эпизодическим.

Для оценки величины запасов рыб над подводными горами в основном проводились тралово-акустические съемки. По данным тралово-акустической съемки, выполненной АтлантНИРО в 2003 г. над подводными горами между 47–57° с. ш., суммарная биомасса макруруса была оценена величиной около 130 тыс. т. Последняя оценка запаса макруруса тралово-акустическим способом осуществлена в 2010 г. на южном участке САХ между 46–50° с.ш., общая биомасса составила 59,4 тыс. т, это больше, чем биомасса на этом же участке в 2003 г. [1, 8].

Оценки запасов берикса обычно отражали мгновенную ситуацию на отдельных подводных горах, в целом величина этих запасов была небольшая. Так, по данным ПИНРО, в период 1976–1995 гг. общая биомасса берикса на Угловом поднятии и в Северо-Азорском районе составляла 17–27 тыс. т. В настоящее время, по экспертным оценкам специалистов ПИНРО, биомасса берикса на Угловом поднятии может быть оценена величиной 10–15 тыс. т, в Северо-Азорском районе – около 7–10 тыс. т [10]. В ходе тралово-акустической съемки, выполненной АтлантНИРО на подводных горах Южно-Азорского района, биомасса берикса определена на уровне примерно 4 тыс. т. В этом же районе суммарная биомасса ставриды и скумбрии, по данным исследований АтлантНИРО в 2000–2010 гг., колебалась от 4,5 до 16,5 тыс. т.

Промысел глубоководных рыб в открытых океанических районах длительное время был нерегулируемым. В последние годы меры по управлению запасами глубоководных рыб стали применяться все более активно. После принятия в 2006 г. резолюции Генеральной Ассамблеи ООН 61/105 о защите уязвимых морских экосистем в региональных международных организациях началось усиленное внедрение защитных мер и в данном направлении.

Согласно рекомендации Комиссии по рыболовству в Северо-Восточной Атлантике (НЕАФК) все участвующие стороны должны были ограничить промысловые усилия на глубоководном промысле величиной 65 % от максимально достигнутого в предыдущие годы уровня. Также было принято решение о закрытии ряда участков САХ для всех видов донного лова. В этих условиях вылов макруруса в районе САХ, по экспертным оценкам специалистов ПИНРО, мог составить от 6 до 13 тыс. т. Однако российские суда в последние годы промысел макуруса на САХ не вели.

К запасу берикса в Северо-Азорском районе относятся те же меры регулирования промысла НЕАФК, что и к запасу макруруса (ограничение промыслового усилия, закрытие участков для донного промысла). В районе Углового поднятия в соответствии с мерами регулирования Организации по рыболовству в Северо-Западной Атлантике (НАФО) запрещается рыболовная деятельность с использованием донных орудий лова. Согласно оценкам специалистов ПИНРО и АтлантНИРО ежегодный вылов берикса на Угловом поднятии может быть в пределах 1–5 тыс. т, в Северо-Азорском районе – около 0,7–1,0 тыс. т [1, 8].

Южно-Азорский район входит в сферу деятельности Комитета по рыболовству в Восточной и Центральной Атлантике (КЕСАФ) при Организации ООН по вопросам продовольствия и сельского хозяйства (ФАО). Промысел в этом районе не регламентируется. По данным АтлантНИРО, возможный вылов ставриды, скумбрии, берикса, рыбы-сабли здесь оценивается в объеме 10–15 тыс. т.

В Южном полушарии основной район с подводными горами промыслового значения – Китовый хребет, он находится в сфере действия международной организации по рыболовству в Юго-Восточной Атлантике (СЕАФО), созданной в 2001 г. Начиная с 2009 г. этой организацией устанавливается ОДУ основных объектов промысла. ОДУ берикса в последние годы равен 200 т, что делает его промысел в этом районе практически нецелесообразным.

В целом сырьевая база подводных гор открытой части Атлантического океана в настоящее время российским флотом почти не эксплуатируется, что обусловлено небольшими величинами запасов промысловых рыб, неустойчивой промысловой обстановкой, усилением международных мер по регулированию промысла. В то же время при определенных условиях эта сырьевая база может использоваться российскими судами в качестве вспомогательной.

Юго-восточная часть Тихого океана

Юго-восточная часть Тихого океана (ЮВТО) располагается от 3 до 48° ю. ш. (см. рис. 1). Существующая вдоль западного побережья Южной Америки система течений (в первую очередь Перуанского течения) обусловливает интенсивное развитие апвеллинга – подъема глубинных вод, богатых питательными веществами, что обеспечивает высокую биологическую продуктивность района. Прибрежные страны, такие как Перу и Чили, во второй половине XX в. вошли в число ведущих рыболовных стран мира. Динамика общего вылова промысловых гидробионтов в ЮВТО представлена на рис. 7 [11]. В последние годы прослеживается снижение суммарного вылова ВБР всеми ведущими в этом районе промысел странами с 12,2 до 6,9 млн т.

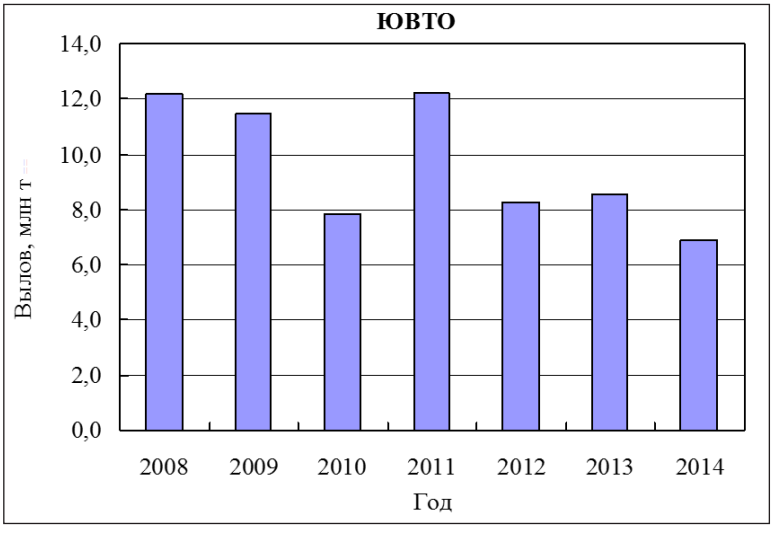

Рис. 7. Динамика общего вылова
промысловых гидробионтов в ЮВТО (2008–2014 гг.)

Основными промысловыми видами в южной части Тихого океана являются перуанская ставрида, восточная скумбрия и перуанская сардина. Ареал сардины локализирован в водах Перу, а ставрида и скумбрия широко распространены в экономических зонах Перу и Чили и за их пределами. В северном подрайоне (3–30° ю. ш.) ставрида и скумбрия образуют скопления в океанической части за зоной Перу только в период нереста (июнь–декабрь). В южном подрайоне (30–48° ю. ш.) ставрида обитает за пределами зоны Чили и образует промысловые скопления круглогодично, скумбрия встречается в основном в качестве прилова. По результатам промысловой деятельности численность ставриды и скумбрии несопоставима – вылов скумбрии в целом по региону составляет не более 3–5 % от общего вылова. В последнее десятилетие большое промысловое значение в водах Перу и Чили приобрел кальмар дозидикус. В районе Чили этот кальмар образует скопления в основном в пределах экономической зоны, в районе Перу отмечены массовые выходы кальмара дозидикуса в открытую часть района за пределы ИЭЗ [8, 9].

В северном подрайоне, кроме скоплений рыб в океанической пелагиали, были обнаружены рыбные концентрации над подводными горами хребтов Наска и Сала Гомес. Здесь были получены промысловые уловы ставриды, южной красноглазки, розовой красноглазки, низкотелого берикса. В 1988–1995 гг. также была выявлена и реализована возможность промысла над подводными горами лангуста (чилийский зубчатый омар).

Основу сырьевой базы рыболовства Перу составляют: массовые пелагические виды рыб – перуанский анчоус, сардинопс, ставрида, скумбрия; демерсальные виды – мерлуза (хек), горбылевые, мероу и др. Наибольшей численностью обладает перуанский анчоус, его запасы полностью используются перуанским промыслом. Промысел анчоуса и мерлузы ведется только национальным флотом, иностранным судам квоты не выделяются.

Запасы основных объектов промысла и, соответственно, их уловы испытывают значительные межгодовые колебания, которые вызваны периодически повторяющимися изменениями абиотических условий. В частности, большое влияние на сырьевую базу рыболовства оказывает явление Эль-Ниньо, выражающееся в резком потеплении океанических вод. Это явление повторяется с периодичностью несколько лет и приводит к депрессии рыбных запасов и изменениям в их пространственном распределении. Так, после мощного Эль-Ниньо 1982–1983 гг. промысла анчоуса в течение двух лет практически не было. К середине 1990-х гг. запасы анчоуса восстановились, его вылов достиг 10 млн т. В последние 10 лет вылов перуанского анчоуса находится в пределах 5–9 млн т.

В конце 90-х гг. прошлого века резко снизился запас сардинопса – с 9,0 до 0,9 млн т. В последующие годы произошло дальнейшее снижение его биомассы, с 2002 г. вылов этого объекта практически прекращен.

На низком уровне в последние годы находятся запасы ставриды и скумбрии, уловы этих видов снижаются. В 2008 г. вылов ставриды и скумбрии также начал квотироваться. В 2010 г. месячный лимит на вылов каждого из указанных видов был определен в объеме 15 тыс. т.

Запас перуанского хека имеет тенденцию к снижению, квоты ежегодно сокращаются, доступ иностранного флота к этому ресурсу маловероятен.

На высоком уровне находится запас перуанского кальмара. В связи с недостатком у Республики Перу собственного флота для промысла кальмара к нему допускаются суда из других стран, таких как Япония и Республика Корея. Годовой вылов кальмара в 2007 и 2008 гг. составил 428 и 485 тыс. т.

Чили занимает одно из ведущих мест в мировом рыболовстве. В период с 1974 по 1986 г. ежегодный прирост вылова составлял в среднем 13 %. С 1988 г. улов превышал 5,0 млн т. Максимальный вылов достигнут в 1994 г. – 8,0 млн т, а с 1995 г. наблюдалось его постепенное снижение. В 2001–2007 гг. годовой улов в ИЭЗ Чили колебался от 3,8 до 4,9 млн т. Основу вылова (88–93 %) в водах Чили составляют пелагические виды рыб: ставрида, анчоус, сельдь, сардинопс, скумбрия. К демерсальным и придонным объектам промысла относятся перуано-чилийский и южный хеки, макруронус, путассу, ошибни, клыкач, скаты и др.

Долгое время считалось, что зоны повышенной биологической продуктивности и, соответственно, районы распространения промысловой ихтиофауны приурочены к прибрежным водам Перу и Чили. В то же время еще в 60-х годах прошлого столетия В.Г. Богоров относил океаническую зону нотальных вод (от побережья Южной Америки до Новой Зеландии) к числу наиболее продуктивных участков Тихого океана [2, 4].

В начале 1979 г. к западу от ИЭЗ Чили были обнаружены плотные скопления перуанской ставриды. В ходе дальнейших поисковых работ, выполнявшихся в западном направлении, скопления ставриды промыслового характера были обнаружены в полосе широт 25–45° ю. ш. на всей акватории до ИЭЗ Новой Зеландии. С 1979 по 1991 г. рыбодобывающий флот бывшего СССР вел стабильный круглогодичный промысел ставриды. Флот в основном работал в ЮВТО от границы ИЭЗ Чили до 125° з. д., что объясняется близостью этого района к портам базирования. Годовой вылов составлял около 1 млн т.

Одновременно проводились интенсивные исследования, направленные на выявление закономерностей распределения промысловых скоплений и межгодовых изменений биомассы ставриды под воздействием абиотических факторов не только в районах работы промыслового флота, но и на всей акватории юга Тихого океана [5].

В целях оценки биомассы промыслового запаса ставриды в 1982–1991 гг. в ЮВТО было выполнено несколько учетных траловых и акустических съемок. Величина биомассы в зависимости от площади акватории, охваченной съемкой, составляла 3,7–9,3 млн т.

По результатам аналитических расчетов биомасса ставриды на акватории от зоны Чили до 125° з. д. в 1979–1991 гг. была относительно стабильна (6,9–9,8 млн т). Биомасса нерестовой части запаса ставриды, оцениваемая по результатам ихтиопланктонных съемок, составляла в разные годы от 2,3 до 10,0 млн т.

В целях оценки современного состояния ставриды ЮВТО за пределами ИЭЗ Чили АтлантНИРО выполнил в последние годы две научно-исследовательских экспедиции в этот район: в 2002–2003 гг. и в 2009 г. В экспедиции 2002–2003 гг. биомасса ставриды на обследованных участках в районе ЮВТО (7,8 млн т) находилась

на уровне периода интенсивного промысла, однако в экспедиции 2009 г. было отмечено резкое сокращение биомассы ставриды на этих же участках (0,8 млн т).

Этот результат подтвердился сокращением в 2008–2010 гг. вылова чилийского промыслового флота, работающего как в собственной ИЭЗ, так и за ее пределами, а также снижением вылова траулеров КНР, стран Евросоюза и Фарерских островов, которые начиная с 2002 г. ведут специализированный промысел ставриды за пределами ИЭЗ Чили.

Причины этого пока не совсем ясны. Возможно, сказался перелов младших возрастных групп ставриды чилийским кошельковым флотом в 2006–2008 гг., совпавший с неблагоприятными для формирования урожайных поколений океанологическими условиями.

Главная особенность получения доступа к ресурсам ставриды и другим биоресурсам юга Тихого океана состоит в том, что недавно созданная региональная международная организация по управлению рыболовством (SPRFMO) уже приступила к выработке временных мер регулирования и их применению. В конце 2010 г. ряд стран (в том числе Россия) подписали Конвенцию этой организации. В это же время с учетом резкого снижения биомассы ставриды в ЮВТО SPRFMO организовала специальную рабочую группу по оценке запасов, в которой принимали участие представители России (специалисты из ВНИРО и АтлантНИРО).

По данным этой рабочей группы общая биомасса ставриды в 2000–2010 гг. сократилась с 9,5 до 2,1 млн т, что не может не вызывать беспокойства всех стран, ведущих в настоящее время промысел в районе ЮВТО [3, 8].

По причине отсутствия к настоящему времени научных данных остается открытым вопрос о состоянии запасов ставриды на акватории к западу от 125° з. д., открытых отечественными учеными и рыбаками в 80-х гг. XX в.

Возможный ежегодный вылов России, определяемый SPRFMO, составляет 15–17 тыс. т.

Для обеспечений в будущем рыболовного присутствия России в уникальном по биологической и промысловой продуктивности районе юго-восточной части Тихого океана в настоящее время требуется как углубленный анализ современных и ретроспективных научных данных, имеющихся в АтлантНИРО, так и активная работа российских делегаций в рабочих группах и в Научном комитете SPRFMO.

Заключение

Океаническое рыболовство – одно из основных звеньев отечественного рыбного хозяйства, требующее постоянного комплексного научного обеспечения. Важные слагаемые научного обеспечения – прогнозы состояния сырьевой базы, особенностей распределения и поведения объектов промысла, а также мониторинг состояния океанических экосистем в реальном масштабе времени. АтлантНИРО – один из бассейновых рыбохозяйственных институтов нашей страны, ведущих такой мониторинг и разрабатывающий прогнозы состояния сырьевой базы ВБР различной заблаговременности. Как уже отмечалось, основные океанические районы исследований АтлантНИРО охватывают акваторию Атлантического океана южнее 50° с. ш., включая его антарктическую часть, и юго-восточную часть

Тихого океана. Возможности добычи водных биологических ресурсов рыбопромысловым флотом России в этих районах представлены в таблице.

Возможный вылов водных биоресурсов в океанических районах исследований АтлантНИРО, тыс. т

Объект промысла	ЦВА		ЮВА		ЮЗА	АчА	ЮВТО
	ИЭЗ	Открытые районы	ИЭЗ	Открытые районы			
Рыба	330	30	260	20	5	6	16
Кальмары	–	–	–	–	35	–	–
Криль	–	–	–	–	–	5610	–
Всего	330	30	260	20	40	5616	16

С точки зрения состояния водных биоресурсов и возможности их использования, в существующих международно-правовых условиях особый интерес для российского рыболовства в зонах ответственности АтлантНИРО представляет район ЦВА. Запасы пелагических рыб, несмотря на периодические колебания численности отдельных видов, в целом находятся в устойчивом состоянии и позволяют вести экономически эффективный промысел. Наибольшее промысловое значение имеет сырьевая база ИЭЗ Марокко и Мавритании, где российский флот работает на основе межправительственных соглашений.

Район ЮВА по своей биопродуктивности соизмерим с ЦВА, но доступ к биоресурсам затруднен жесткой позицией прибрежных стран (Ангола, Намибия, ЮАР) в отношении иностранного промысла. Сейчас промысел в ЮВА ведут отдельные российские суда на основе коммерческих лицензий. При достижении договоренностей на межгосударственном уровне масштабы российского промысла могут быть расширены.

Сырьевая база пелагических и глубоководных рыб подводных гор открытых вод Атлантического океана в настоящее время может рассматриваться только в качестве вспомогательной.

Перспективными объектами океанического промысла в Атлантике являются тунцы, кальмары и антарктический криль. Вовлечение запасов этих гидробионтов в сферу российского рыболовства требует освоения современных методов их добычи и переработки. Также необходимы продолжение и активизация деятельности России в международных организациях, регулирующих промысел (ФАО, ИККАТ, АНТКОМ и др.).

Для обеспечения рыболовного присутствия России в уникальном по биологической и промысловой продуктивности районе юго-восточной части Тихого океана в настоящее время требуется как углубленный анализ современных и ретроспективных научных данных, так и активная работа российских делегаций в SPRFMO.

Всего в океанических районах исследований АтлантНИРО отечественным флотом может добываться более 6,3 млн т, при этом почти 90 % из этого запаса приходится на антарктический криль.

Главная задача АтлантНИРО в исследованиях водных биоресурсов Атлантики и юго-восточной части Тихого океана в современных условиях состоит в защите

интересов российского рыболовства на международном уровне. Это возможно путем оценки на строгой научной основе в исследуемых районах водных биологических ресурсов и разработки рекомендаций по их рациональному использованию с учетом требований международных конвенций и двусторонних договоров.

Литература

1. *Архипов А.Г., Гербер Е.М., Касаткина С.М. и др.* Использование сырьевой базы рыболовным флотом Российской Федерации в Атлантическом океане в зонах ответственности АтлантНИРО // Тр. ВНИРО. 2016. Т. 160. – С. 41–59.
2. *Богоров В.Г.* Биомасса зоопланктона и продуктивные районы Тихого океана // Планктон Тихого океана. – М.: Наука, 1967. – С. 221–229.
3. *Глубоков А.И., Глубоковский М.К., Рабчун М.А.* Ставрида южной части Тихого океана – современное состояние запаса, регулирование и перспективы промысла // Рыбное хоз-во. 2013, № 1. – С. 3–6.
4. *Перуанская* ставрида *Trachurus symmetricus murphyi* в открытых водах южной части Тихого океана / А.А. Елизаров, А.С. Гречина, Б.Н. Котенев, А.Н. Кузнецов // Вопр. ихтиологии. 1992. Т. 32, вып. 6. – С. 57–73.
5. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 278 с.
6. *Малинин В.Н., Чернышков П.П., Гордеева С.М.* Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 155 с.
7. *Нигматуллин Ч.М.* Динамика промысла и состояния запаса аргентинского кальмара Юго-Западной Атлантики в 2009–2013 гг. // Промысл.-биол. иссл. АтлантНИРО в 2010–2013 годах. Т. 2. Океанические районы. – Калининград: АтлантНИРО, 2014. – С. 151–185.
8. *Промысловое* описание продуктивных районов Атлантического океана (к югу от параллели 50° с. ш.) и Юго-Восточной части Тихого океана. ФГУП «АтлантНИРО». – Калининград: Капрос, 2013. – 415 с.: ил.
9. *Промыслово-океанологические* исследования в Атлантическом океане и южной части Тихого океана / под ред. В.Н. Яковлева. В 2 т. – Калининград: АтлантНИРО, 2002. Т. 1. – 248 с. – Т. 2. – 273 с.
10. *Состояние* сырьевых биологических ресурсов Баренцева моря и Северной Атлантики в 2013 г. – Мурманск: ПИНРО, 2013. – 120 с.
11. *FAO* Yearbook / Fishery and aquaculture statistics (2014). 2016. Rome: FAO. – 79 p.
12. *Gasyukov P.S., Kasatkina S.M.* 2013. Dynamic of the krill fishery in the Area 48 and its relation to climate variability and changes in fishing technology // CCAMLR Working Group on Ecosystem Monitoring and Management, Bremerhaven, Germany, 1 to 10 July 2013. Document CCAMLR WGEMM-13/25. – 23 p.
13. *Nesterov A.A.* Annual Report of Russia // IKKAT, Report for biennial period, 2013–2014, part I (2014) Vol. 3. – Madrid, Spain, 2014. – P. 135–140.

УДК 639.2:551.583

Б.Н. Котенев, А.С. Кровнин, В.В. Масленников, Н.В. Мордасова, Г.П. Мурый

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО РЫБОЛОВСТВА В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, vvmaslen@vniro.ru

B.N. Kotenev, A.S. Krovnin, V.V. Maslennikov, N.V. Mordasova, G.P. Moury

DEVELOPMENT PROSPECTS OF WORLD FISHERIES IN RELATION TO CLIMATE CHANGE

В данной обзорной статье обсуждаются современные уровни уловов в Мировом океане по промысловым районам ФАО (продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН). На основе анализа изменений наиболее крупных запасов водных биоресурсов под влиянием изменений климата в 2020-е и 2030-е годы оцениваются вероятные изменения уловов в наиболее продуктивных промысловых районах в Тихом и Атлантическом океанах, а также в Южном океане. Весьма вероятно, что уровень мировых уловов увеличится в 2020 г. до 90 млн т, а в 2030 г. при формировании сардинных эпох в Тихом океане он должен возрасти до 95 млн т.

Ключевые слова: *уловы, водные биоресурсы, промысловые районы ФАО, глобально-региональные изменения климата.*

This review paper investigates current amount of commercial catch in the World Ocean in FAO fishing areas and evaluates possible changes in catch in the most productive regions of Atlantic, Pacific as well as Southern Oceans. The assessment is based on analysis of fluctuations of the most valuable stocks and assumed cooling of climate by 2020 and 2030. The total world catch is forecasted to increase to 90 billion metric tons, and under condition of sardine regime in the Pacific Ocean the total catch will raise to 95 million metric tons.

Keywords: *catches, marine biological resources, FAO fishing areas, global and regional climate change.*

1. Введение

По мнению специалистов ФАО, потепление климата, продолжающееся с 1970 г. и в последние годы сопровождавшееся возрастанием количества экстремальных гидрометеорологических явлений, является угрозой для устойчивости рыболовства и развития аквакультуры. Однако, как показывает динамика мировых уловов по основным промысловым районам ФАО (рис. 1), серьезного отрицательного воздействия климата на нее пока нет, в продуктивных районах Северного полушария [14, 20, 24, 29] они остаются на уровне предельно высоких величин, когда-либо отмечавшихся ранее.

Аналогичная ситуация сохраняется в Индийском океане (районы 51 и 57). В высокопродуктивном районе юго-восточной части Тихого океана (ЮВТО) (87)

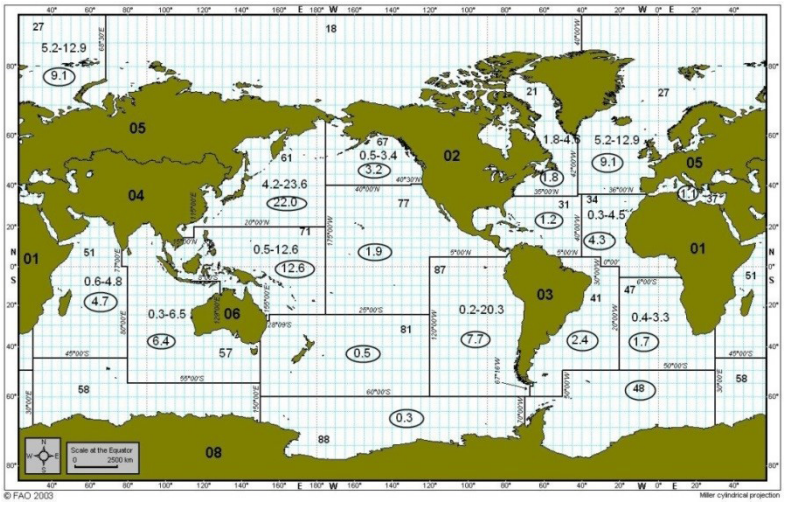

Рис. 1. Распределение мирового улова по районам ФАО (1950–2015 гг.) (без водорослей и продуктов водных животных). Общий улов в 2015 г. в районе дан в овале (в млн т), выше него – диапазон изменения уловов с 1950 по 2015 г.

нынешнее снижение уловов – до 7,7 млн т, связанное с динамикой явлений Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК), повторяет снижение уловов перуанского анчоуса в 1970-х годах, за которым последовал его рост, что обеспечило вместе с высокими уловами других рыб вылов 20 млн т. В районах Юго-Восточной Атлантики (ЮВА) (47), Северо-Западной Атлантики (СЗА) (21), Юго-Западной Атлантики (ЮЗА) (41) двукратное снижение уловов наступило после климатического сдвига 1988–1989 гг. и с тех пор остается на этом низком уровне на протяжении 27 лет, то есть оно не связано с сильным современным потеплением. Все это позволяет говорить об устойчивости рыболовства на протяжении почти 30 лет (рис. 2) и об узком диапазоне изменения уловов в этот период от 78 до 85 млн т. Рост рыбной продукции происходил в этот период за счет аквакультуры, продукция которой в ближайшие годы сравняется с уловами промышленного рыболовства. График мировых уловов (см. рис. 2) показывает, что с 1950-х годов до 1988 г. шел их непрерывный рост с 20 до 78–85 млн т, связанный с усилением интенсивности промысла и, по нашему мнению, не связанный с интенсивным глобальным потеплением в XX в.

В настоящее время Российская Федерация занимает шестое место в мире с общим уловом 4,5 млн т (табл. 1), в то время как в конце 1980-х годов по уловам СССР был на первом месте [10]. Такое падение уловов связано со снижением промысловых мощностей в связи с потерей части флота в начале 1990-х годов и соответствующим его уходом из большинства районов мирового промысла. Оставшийся флот работает в основном в пределах своих вод, в конвенционных районах Северной Атлантики и на основе соглашений только в ИЭЗ Марокко и Мавритании.

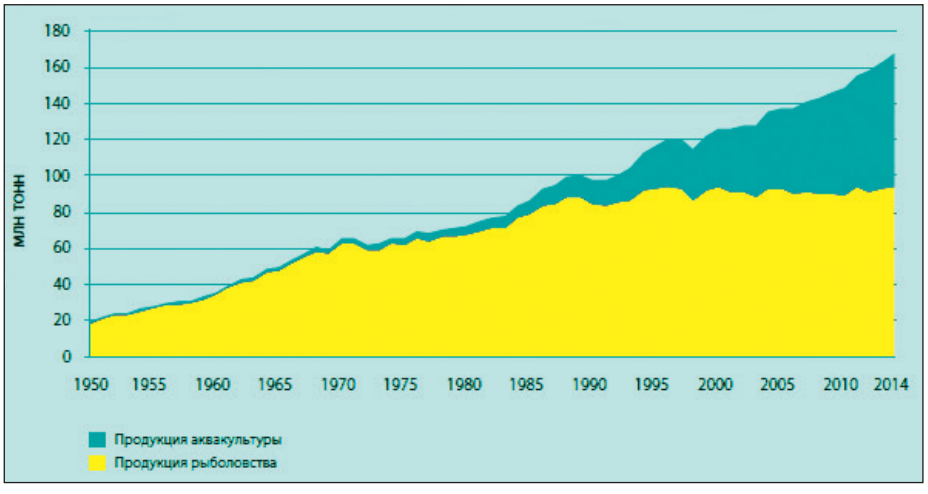

Рис. 2. Мировой объем ежегодной продукции
промышленного рыболовства и аквакультуры (в млн т) [15]

Таблица 1

Вылов 10 ведущих стран в тоннах
(без водорослей и продуктов водных животных) по данным ФАО

№	Страна	2015 г.	%
1	Китай	17 591 299	19,0
2	Индонезия	6 485 320	7,0
3	США	5 038 791	5,4
4	Индия	4 843 388	5,2
5	Перу	4 824 050	5,2
6	Российская Федерация	4 457 138	4,8
7	Япония	3 460 168	3,7
8	Вьетнам	2 757 314	3,0
9	Норвегия	2 293 698	2,5
10	Филиппины	2 151 502	2,3
Всего		53 902 668	58,1

Очевидно, что потепление и экстремальные явления последних десятилетий пока еще не оказали существенного воздействия на устойчивость рыболовства. Насколько оправданы эти опасения ФАО в ближайшие десятилетия? Для этого необходимо рассмотреть, какие изменения климата произойдут в 2020–2030-е годы в основных продуктивных районах ФАО в Северном и Южном полушариях, и оценить возможные изменения состояния биоресурсов вод под влиянием нового климатического режима.

2. Современные представления об естественных изменениях климата

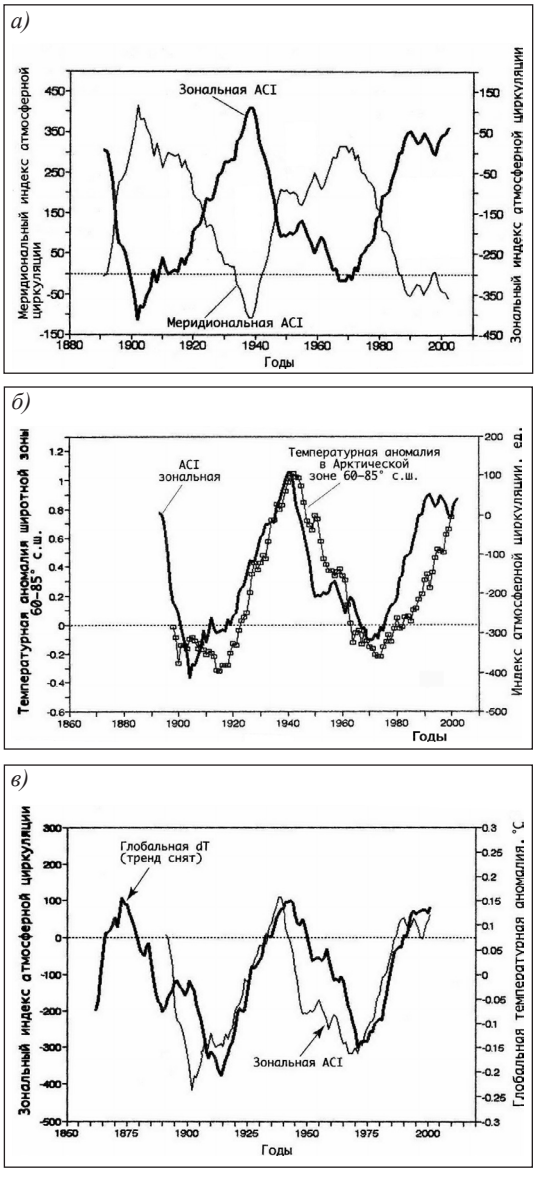

Рис. 3. *а* – Динамика меридиональной и зональной ACI, 1891–2000 гг.; *б* – сравнительная динамика зональной ACI и арктической *dT*, 1891–2000 гг.; *в* – сравнительная динамика глобальной dT со снятым трендом и зональной ACI, 1861–2000 гг. [5]

Как известно, на протяжении последних 150 лет в глобальной температуре воздуха хорошо выражены положительный линейный тренд и 60-летний цикл, вклад которых в дисперсию колебаний температуры соответственно составляет 64 и 12 %. Кроме того, многие исследователи [5, 8, 9, 16, 20] выделили долговременные изменения в различных характеристиках климата с 60–70-летней периодичностью. Отметим, что тренд в колебаниях запасов массовых гидробионтов в различных районах Мирового океана практически не проявляется. В то же время 60–70-летние циклы часто являются доминирующими в изменениях численности и биомассы, прежде всего, таких объектов промысла, как тихоокеанские лососи, сардины, анчоусы. О наличии колебаний схожего масштаба свидетельствуют также результаты анализа данных по атлантической треске и сельди.

Л.Б. Кляшторин и А.А. Любушин [5] путем анализа изменений глобальных климатических индексов (аномалий температуры приземного воздуха, показателей зональной и меридиональной циркуляции атмосферы, известных как индексы Вангенгейма–Гирса) за последние 110 лет (рис. 3) установили, что колебания индекса зональной и меридиональной циркуляции (Atmospheric Circulation Index – ACI) происходят с 60-летней цикличностью (рис. 3, *а*). Характерно, что зональная ACI хорошо коррелирует с аномалиями температуры воздуха (*dT*) в зоне 60–85° с. ш. (рис. 3, *б*), а также с глобальной аномалией

температуры (рис. 3, *в*). На этой основе составлена схема чередования теплых и холодных эпох за период с 1880 по 2020 г., где после 2010 г. указано наступление новой холодной эпохи.

Эти эпохи хорошо выделяются по изменениям температуры атлантической воды в слое 0–200 м на Кольском разрезе в Баренцевом море (рис. 4). Предсказанное авторами [20] похолодание Баренцева моря началось не после 2010 г., а весной 2017 г., то есть через 29 лет после 1988 г. Таким образом, 30-летние периоды похолодания и потепления сохраняются (рис. 4, *б*).

Аналогичная периодичность изменения климата характерна для Северного Ледовитого океана [16]. В пределах Южного полушария, в частности в Южном океане, также выявлена 60-летняя изменчивость климатических эпох двух типов: зонально-волновой и зонально-симметричной [8].

Они составляют временную структуру долгопериодных климатических колебаний. Эти две долговременные климатические эпохи характеризуются набором противоположных условий, формирующих поля атмосферного давления, ветра, температуры воздуха и воды. Эпоха зонально-симметричного типа атмосферной циркуляции существовала до 1978–1981 гг. (с 1949–1950 гг. по имеющимся данным). Характеризовалась она ослаблением контраста между поясами высокого

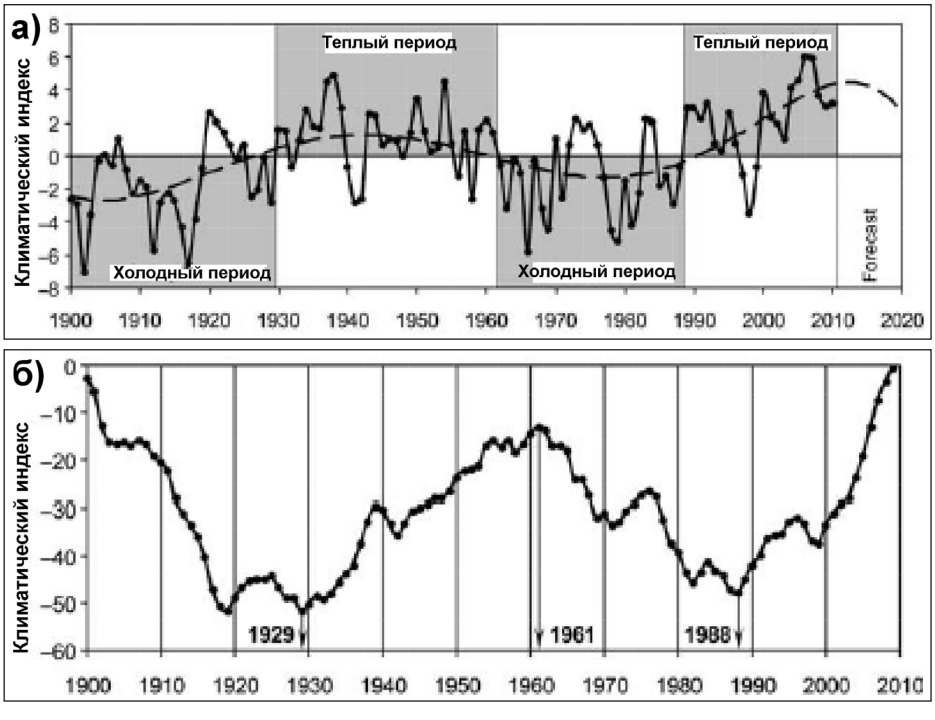

Рис. 4. *а* – климатический индекс для Баренцева моря 1900–2009 гг. (сплошная линия), его полиномиальное приближение шестой степени (пунктирная линия) и прогноз до 2020 г.; *б* – кумулятивная кривая Баренцева моря, где 1929, 1961 и 1988 гг. являются годами перехода от холодного к теплым периодам и наоборот [20]

(субтропики – умеренные широты) и низкого (антарктический пояс) давления, что сопровождалось ослаблением стоячей волны колебаний, минимальной ее амплитудой, усилением зонального переноса, ослаблением меридиональных воздействий. После 1978–1981 гг. наступила эпоха зонально-волновая, увеличился контраст между отмеченными выше климатическими поясами, амплитуда стоячей волны также возросла, усилился воздухо- и водообмен, а с ними и изменчивость температуры воздуха и воды.

В настоящее время есть явные показатели смены существовавшей после 1978–1981 гг. эпохи. По нашим предположениям, новая эпоха началась приблизительно после 2007 г., когда система вступила в очередную эпоху превалирования повышенных величин индекса ЮК, сопровождающегося снижением вероятности развития теплой фазы колебаний (Эль-Ниньо) и, напротив, ростом вероятности развития их холодной фазы (Ла-Нинья).

На графике, показывающем ход изменений средней летней (декабрь–февраль для Южного полушария) величины индекса (рис. 5, *а*), виден этот период на фоне многолетнего хода. Эта эпоха уже проявила себя формированием двух очень сильных явлений Ла-Нинья (на уровне исторически самых сильных). При этом нужно помнить, что для каждого из периодов характерны некие рецидивы, то есть неизбежные естественные нарушения в свойственном данной фазе ходе индекса. Это случилось, например, в 2015–2016 гг., когда наблюдалось очередное событие Эль-Ниньо. Оно, конечно, сказалось на деталях состояния антарктической системы, но, вопреки ожиданиям, не сильно. Это можно отнести к явным серьезным нарушениям в общей глобальной системе атмосферной циркуляции.

Впервые влияние Эль-Ниньо не привело к росту поверхностной температуры воды в восточной части тихоокеанского сектора. Более того, температура там понизилась (рис. 6). Реакция на это довольно интенсивное событие Эль-Ниньо в планетарном масштабе была, как обычно, заметна. Необычность же ее заключается в том, что направлена она в большей степени на Северное полушарие. В Тихом океане наблюдалось сильное повышение температуры воды. Это же произошло и в Арктическом бассейне. А вот в южном направлении наблюдалось некое «затишье», вектор влияния Эль-Ниньо направлен на север. Создается впечатление, что на современном этапе антарктический климатический пояс имеет превалирующее влияние на все Южное полушарие. Это может быть связано с нарушениями в системе глобальных климатических ячеек Хэдли, Феррела и Полярной.

Примерно к этому же периоду, то есть после 2007 г., можно отнести начало тенденции к постепенному снижению индекса антарктического колебания (АКК) (рис. 5, *б*), что демонстрирует завершение «эпохи контрастов» и переход к более спокойной эпохе, характеризующейся повышенной изолированностью, зональностью и общим похолоданием в антарктическом поясе. Можно полагать, что заканчивается длительный период высоких значений индекса АКК, характеризовавших высокий контраст атмосферного давления между антарктическим поясом (низкого давления) и поясом умеренных широт (высокого давления). Общее похолодание в антарктическом поясе уже заметно по исторически максимальному распространению льда, отмеченному в 2014 г. – 20 млн км^2.

Подтверждением наших выводов стали сведения американского климатолога Б. Тисдейла [31], который привел график межгодовых изменений средней температуры поверхности Южного океана (рис. 5, *в*).

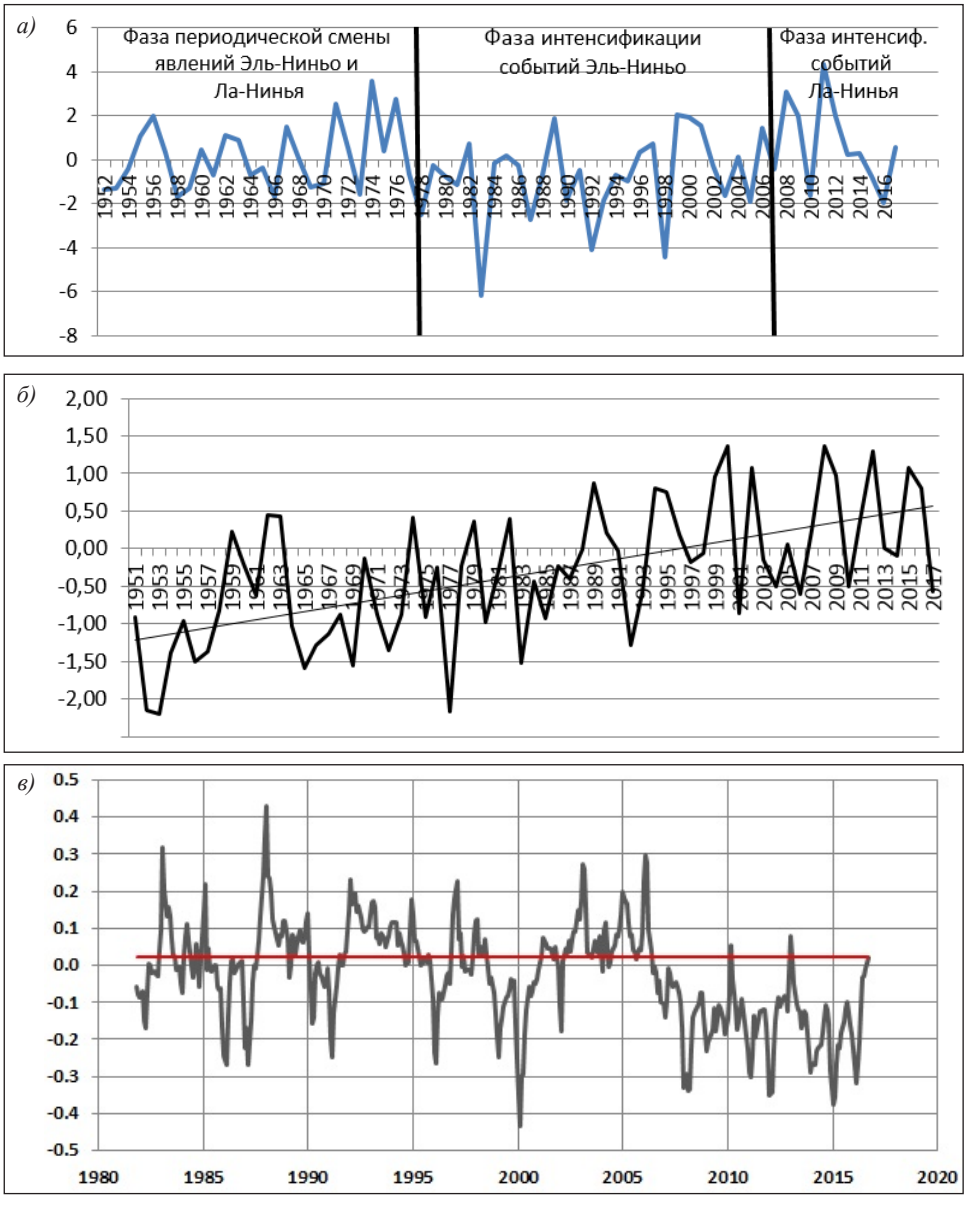

Рис. 5. *а* – ход летнего индекса ЮК (1952–2017 гг.); *б* – ход летнего индекса АКК (1951–2017 гг.); *в* – график изменений средней поверхностной температуры Южного океана [31]

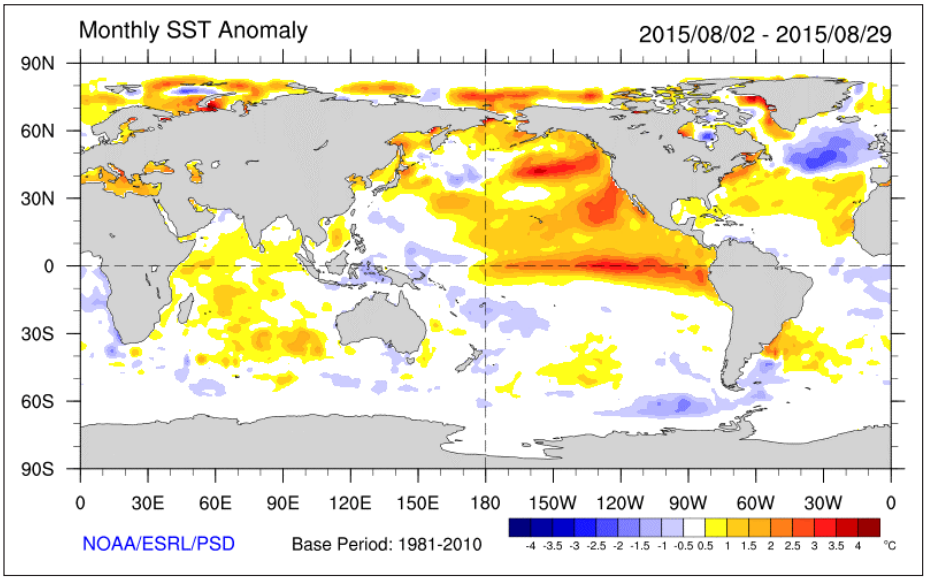

Рис. 6. Распределение температуры воды в августе 2015 г.
Начало события Эль-Ниньо 2015–2016 гг. (www.esrl.noaa.gov)

3. Ожидаемые долговременные изменения крупнейших запасов водных биоресурсов под влиянием климата в основных промысловых районах ФАО в 2020–2030-е годы

В связи с ожидаемым относительным похолоданием в 2020–2030-х годах в пределах Северного и Южного полушарий рассмотрим на основе ранее установленных корреляционных связей [5, 7, 8, 11, 17, 19, 23, 25, 27] между долговременными изменениями климата и состоянием популяций некоторых видов гидробионтов будущее состояние сырьевой базы мирового рыболовства.

3.1. Ожидаемые изменения запасов и уловов рыб в Тихом океане

В Северной Пацифике (61, 67 районы), где в последнее 30-летие ежегодно добывается 30 % рыбы от всего мирового улова – от 25 до 28 млн т (в 2015 г. – 25,2 млн т), основу уловов составляют мелкие пелагические рыбы (анчоус, сардина, сайра, ставрида, скумбрия, сельдь), тихоокеанские лососи, демерсальные виды: минтай, треска, пикша, хек, палтусы, камбалы, крупные пелагические рыбы (тунцы), головоногие моллюски, другие беспозвоночные (крабы, креветки).

К видам, запасы которых испытывают долговременные колебания в наибольшей степени, относятся сардина, анчоус, сельдь, минтай, треска, палтусы, камбалы, тихоокеанские лососи, головоногие моллюски.

Как показано в работе Л.Б. Кляшторина и А.А. Любушина [5], для таких массовых популяций рыб Тихого океана, как минтай, тихоокеанские лососи, сардина, чилийская ставрида, рост их уловов связан с усилением зональной циркуляции, которая обусловливается, в свою очередь, усилением интенсивности Алеутского

минимума и субтропического антициклона и их взаимодействием. Одновременно океанический индекс тихоокеанской декадной осцилляции (ТДО) находится в позитивной фазе (рис. 7). В связи с предполагаемым наступлением эпохи относительного похолодания в 2020-е и 2030-е годы, когда будут наблюдаться отрицательные фазы Западно-Тихоокеанского колебания дальней связи (ЗТ) и ТДО, произойдет существенное снижение уловов тихоокеанских лососей (до 0,5 млн т). Для южных запасов лосося это прослеживается последнее десятилетие.

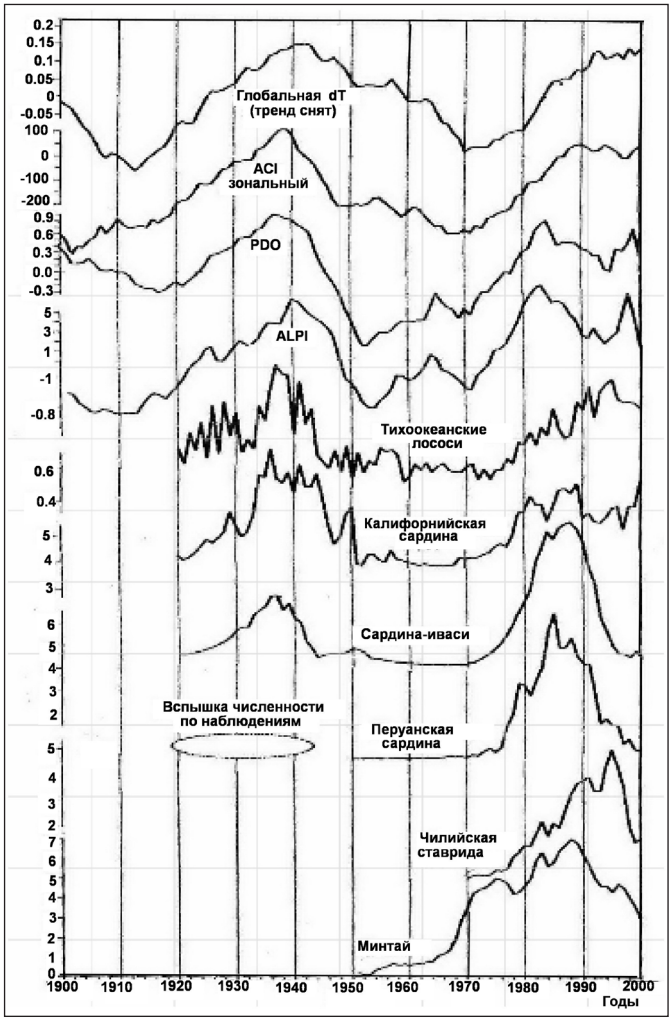

Рис. 7. Сравнительная динамика климатических индексов и уловов главных промысловых видов Тихоокеанского региона. PDO – индекс тихоокеанского декадного колебания, ALPI – индекс Алеутского минимума атмосферного давления, ACI – индекс зональной атмосферной циркуляции [5]

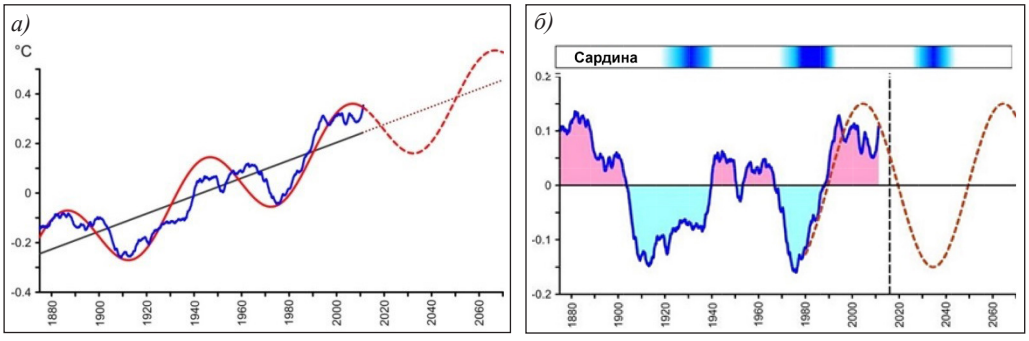

Рис. 8. Изменения среднемесячных аномалий температуры поверхности океана (АТПО) (°С) в Северной Пацифике, сглаженных 121-месячным скользящим осреднением по данным с января 1864 г. по май 2016 г.: *а* − фактические данные, *б* − после удаления линейного тренда и прогноз до 2030–2060 гг. [1]

В отличие от лососей, рост запасов которых происходит в конечную фазу потепления, рост запаса сардины-иваси происходит в начальную фазу потепления. Так, в последнюю сардинную эпоху ее урожайные поколения были зафиксированы в период с 1972 по 1987 г. Резкая смена на неурожайные поколения сардины-иваси наступила в 1988–1991 гг., когда наблюдался быстрый рост уловов дальневосточных лососей. Как показано в работе О.А. Булатова и др. [1], следующая сардинная эпоха начнется в конце 2020-х годов и начале 2030-х годов (рис. 8).

В последнюю сардинную эпоху биомасса сардины в Тихом океане достигала 20 млн т [1], а максимальный улов в 1985 г. составил 5 млн т. Естественно, в 2030-е годы такие уровни уловов покроют в Северо-Западной части Тихого океана (СЗТО) любые снижения уловов других видов.

По величине уловов минтай в 2014 г. был на первом месте, так как обеспечивал вылов 3,2 млн т, на втором месте – перуанский анчоус с уловом 3,14 млн т. В динамике самых крупных запасов минтая имеются заметные различия [7]. Так, восточно-беринговоморский запас имел наибольшую биомассу – 10–12 млн т – с 1980 по 2003 г. Значительно меньше – 6–8 млн т – в 1960-е и 1970-е годы, а также в 2004–2010 гг. В последние годы на долю минтая в северо-восточной части Тихого океана (СВТО) приходится 40 % общего улова. В годы высокой биомассы это было связано с частыми урожайными поколениями начиная с 1977 г., когда было зафиксировано сверхурожайное поколение этого и других запасов минтая.

Западно-беринговоморский минтай в 1960–1980-е годы имел запас 2–4 млн т, наиболее урожайные поколения были в 1973–1986 гг. Затем запасы, биомасса и урожайность резко снизились в 1990-е и 2000-е годы, новые урожайные поколения стали появляться с 2005 г.

Западно-камчатский запас имел высокую биомассу – 7–8 млн т – и частые урожайные поколения в 1980–1990-е годы, затем произошел спад биомассы в 1996–2000 гг. до 2 млн т, но с 2004 г. вновь стали появляться урожайные поколения и начался новый рост запаса. Для этого запаса, как и для восточно-беринговоморского, было характерно снижение биомассы в 1970-е годы до 4 млн т.

Снижение урожайности минтая в СЗТО после резкого потепления зимой и весной в 1988–1989 гг. указывает на то, что похолодание в 2020-е и 2030-е годы будет способствовать росту этих запасов. Скорее всего, это связано с тем, что кормовая база в эпоху похолодания в СЗТО резко улучшается, что способствует хорошему нагулу и воспроизводству, а условия обитания в районе нереста отличаются не столь значительно. Учитывая, что биомасса западно-камчатского минтая меняется в 2–4 раза, можно ожидать, что в 2020-е годы будет рост уловов в СЗТО. У восточно-беринговоморского минтая при похолодании, как это было в 1960–1970-е годы, биомасса будет на среднем уровне или ниже 6 млн т. Но промысел здесь сильно зарегулирован, и поэтому улов, скорее всего, сохранится на современном уровне.

Следовательно, в целом для Северной Пацифики уловы минтая, скорее всего, возрастут с 3,2 до 4–4,5 млн т в 2020-е и 2030-е гг.

Тихоокеанские морские сельди (после сардины-иваси, анчоуса, ставриды, скумбрии и тихоокеанских лососей) также характеризуются крупнейшими запасами. По их динамике выделяются три группы, имеющие различную долговременность эпох с высокой численностью [11]. Для самой крупной популяции южной группы сахалино-хоккайдской сельди в 1875–1935 гг. была характерна 60-летняя эпоха высокой численности и уловов. Уловы этой сельди в основном были выше 0,6 млн т и часто достигали 0,7–0,8 млн т, в отдельные годы 1 млн т. Полагают, что эта эпоха связана с вековыми минимумами солнечной активности [11]. В этой связи можно предполагать, что в 2020-е и 2030-е годы, когда наступит очередной вековой минимум солнечной активности, этот запас вновь увеличится и будет очередная длительная эпоха его высокой численности и уловов.

В отличие от южной группы, для северной группы морских сельдей (охотская, гижигинско-камчатская, корфо-карагинская, анадырская) характерны короткопериодные, близкие к 5–10-летним, чередования поколений повышенной и пониженной численности, которые сопровождаются частой изменчивостью размерно-возрастной структуры.

Для охотской популяции характерны 20-летние колебания ее биомассы [14]. Так, в период 1968–1977 гг. ее уловы достигали 400 тыс. т. В эпоху депрессии в 1978–1994 гг. уловы снизились до 20–150 тыс. т. Новая эпоха роста запаса была в 1995–2010 гг. В безледные теплые 2000-е годы было пять урожайных поколений, а в 2010-е годы – четыре (2014–2017 гг.). Подтвердилась закономерность: в четные десятилетия более часты урожайные поколения, тогда как в нечетные количество неурожайных поколений возрастает [11]. В этой связи можно ожидать, что в 2020-е годы для охотской популяции будут более частыми урожайные поколения. Во всяком случае с 2019 по 2022 г. запас будет увеличиваться за счет поколений 2014–2017 гг. В 2030-е годы, когда ожидается сильное похолодание СЗТО, вероятно, будут преобладать неурожайные поколения.

В восточной группе популяций морских сельдей в пределах СВТО наиболее крупной является восточно-беринговоморская мегапопуляция с рядом субпопуляций. Для нее характерны противофазные колебания уловов и урожайности поколений по сравнению с охотской сельдью. Так, наиболее урожайные ее поколения были в 1977–1997 гг. [22]. Более мелкие популяции сельдей характерны для СВТО

в заливе Аляска и южнее. Восточно-беринговоморская популяция в условиях похолодания будет характеризоваться бедными и среднеурожайными поколениями.

Таким образом, из популяций массовых сильно флуктуирующих видов в Северной Пацифике ожидается рост запасов минтая, обитающих в СЗТО от западной части Берингова моря до Японского моря, включая восточные и западные (у берегов Кореи) популяции. Это даст в 2020-е и 2030-е годы прибавку в его уловах не менее 1,0–1,5 млн т. Запасы минтая в СВТО сохранятся на среднем уровне – около 6,0 млн т или ниже – до 4 млн т. Однако современный уровень уловов минтая в СВТО, скорее всего, сохранится.

Запасы тихоокеанских лососей будут на низком уровне в связи с зимним похолоданием и поздней холодной весной. Их уловы снизятся до 0,5 млн т. Очередная сардинная эпоха в СЗТО, скорее всего, сформируется в 2030-е годы, что может обеспечить в эти годы ее уловы на уровне 3–5 млн т, в том числе уловы отечественного флота могут возрасти до 1 млн т. Следовательно, в целом экспертно уловы в Северной Пацифике в 2020-е и 2030-е годы могут возрасти до 30–32 млн т.

Центрально-западная часть Тихого океана (ЦЗТО – 71 район) – одна из наиболее продуктивных. С 1950-х годов здесь наблюдается непрерывный рост уловов, и в 2015 г. они достигли 12,6 млн т. Основными видами являются тунцы и тунцовые виды, доля вылова которых достигла 26 % (ФАО, 2016). В число основных видов входят также сардинелла и анчоус. Этот район уже обеспечивает около 15 % мирового объема продукции рыболовства. Скорее всего, при ожидаемом относительном похолодании в 2020-е и 2030-е годы биопродуктивность вод района возрастет, поэтому тренд на увеличение уловов в эти годы сохранится. Учитывая тренд роста уловов в 2000-е годы, уже к 2020 г. они должны возрасти до 15 млн т. Если этот тренд сохранится, то уже к 2025 г. уловы возрастут до 18 млн т. Следовательно, по уровню уловов он почти сравняется с СЗТО (в 2015 г. – 22 млн т) и в сумме в 2025 г. эти два района будут обеспечивать почти 50 % мирового улова, несмотря на его рост.

Юго-восточная часть Тихого океана (ЮВТО – 87 район) (см. рис. 1) также является высокопродуктивным районом Мирового океана, благодаря его прибрежным и океаническим апвеллингам, а также поступлению в его пределы субантарктических вод, богатых биогенными элементами. Однако для него характерна большая долговременная изменчивость уловов под влиянием явлений ЭНЮК (см. рис. 5, *а*).

Основу уловов составляет перуанский анчоус, а также сардина, ставрида. В последние годы растет вылов гигантского кальмара (Гумбольта) (рис. 9).

Для отечественного рыболовства наибольший интерес представляет популяция океанической южно-тихоокеанской ставриды, обитающей и воспроизводящейся в обширной зоне между 35 и 52° ю. ш. (так называемый «ставридный пояс»). Он был открыт, изучен и освоен советским поисковым, научным и промысловым флотом в конце 1970-х годов. Годовые уловы промысловых судов СССР достигали 1,3 млн т. По данным экспедиций биомасса этой популяции оценивалась в 20 млн т и более. Это было связано с частыми урожайными поколениями этой ставриды под влиянием высокой интенсивности явлений Эль-Ниньо в период с 1977 по 1998 г. (см. рис. 5, *а*). В начале 2000-х годов их интенсивность ослабла,

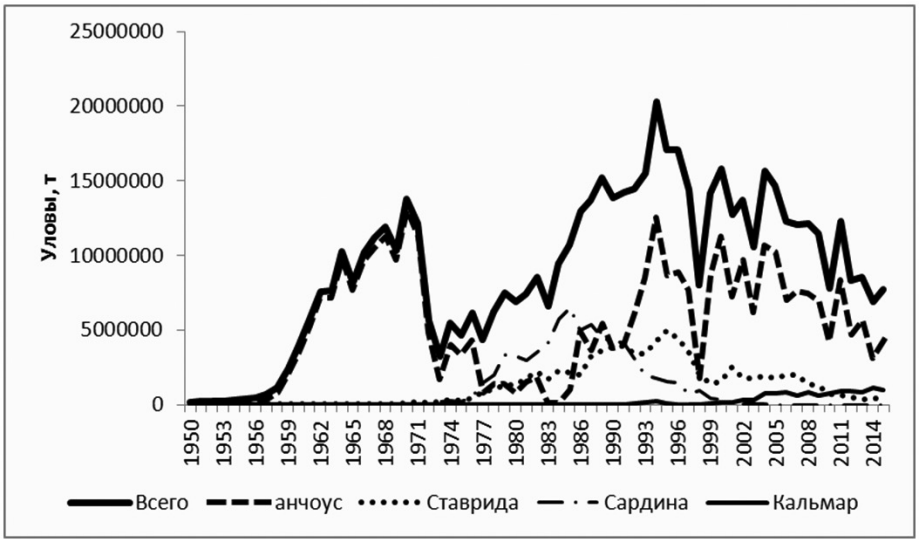

Рис. 9. Межгодовая изменчивость уловов в ЮВТО

а с 2007 г. началась фаза интенсификации явлений Ла-Нинья. Эти климатические изменения привели к тому, что биомасса океанической ставриды в ЮВТО резко снизилась. Однако ее освоение продолжается судами ЕС, КНР, Республики Корея и других стран.

В 2020-е годы уловы в этой зоне сохранятся на уровне 8–10 млн т. Возможен рост уловов гигантского кальмара. В 2030-е годы одновременно с ростом уловов японской сардины-иваси (см. рис. 8) возрастут уловы перуанской ставриды до 2–3 млн т, аналогично тому, как это было в 1970–1990 гг.

В пределах центрально-восточной части Тихого океана уловы сохранятся в предстоящие десятилетия на уровне 2 млн т. При росте запаса калифорнийской сардины уловы могут в 2030-е годы возрасти до 2,5 млн т. В целом по Тихому океану в 2020-е и 2030-е годы благодаря увеличению запасов минтая, морских сельдей, японской, перуанской и калифорнийской сардины, тунцов в ЦЗТО и во всех районах головоногих моллюсков, в основном кальмаров, уловы в океане можно экспертно оценить в 2025 г. на уровне 50 млн т по сравнению с 46 млн т в 2015 г., а в 2035 г. – около 55 млн т. Следовательно, в эти годы возрастет и общий мировой улов.

3.2. Ожидаемые изменения запасов и уловов рыб в промысловых районах (51, 57) Индийского океана

В западной части Индийского океана уже в 2000-м году уловы достигли 4 млн т. В последние годы они были на уровне 4,6 млн т (2013 г.) и 4,7 млн т (2015 г.). Как во всех тропических и субтропических водах, тунцы составляют заметную долю. Полагают, что 68 % рыбных запасов используется полностью, а 32 % перелавливаются [15].

Учитывая устойчивость условий обитания ресурсов, в 2020-е и 2030-е годы уровень уловов, вероятно, сохранится на современном уровне или незначительно превысит 5 млн т. В северной, наиболее продуктивной части района имеются резервы кальмаров. Их освоение может обеспечить большой рост уловов.

В восточной части (район 57) океана в последнее десятилетие уловы выросли на 50 % и в последние 3 года составили 7,7 млн т. Рост уловов связан с расширением промысла в новых районах и использованием новых видов [15]. В ИЭЗ Австралии происходит снижение уловов в связи с сокращением излишних промысловых мощностей. По-видимому, в этом районе в 2020-е и 2030-е годы уловы возрастут до 10 млн т и более. В целом оба района обеспечат уловы не менее 15 млн т.

3.3. Ожидаемые изменения запасов и уловов рыб в Атлантическом океане

Северная Атлантика (21, 27 районы ФАО)

Наиболее продуктивным районом в Северной Атлантике является Северо-Восточная Атлантика (СВА) (27 район), где уловы с 1950 г. по настоящее время изменялись в пределах от 5,2 до 12,9 млн т, в том числе в 2015 г. вылов составил 8,1 млн т (см. рис. 1), тогда как в Северо-Западной Атлантике (СЗА) (21 район) уловы менялись от 1,8 до 4,6 млн т. В 2015 г. вылов составлял всего 1,8 млн т, то есть на самом низком уровне и в 4 раза меньше, чем в СВА. Основу уловов в этих районах ФАО дают популяции флуктуирующих пелагических рыб: мойве, сельди, сардине, ставриде, скумбрии, путассу, а также демерсальных: треске, пикше, хеку, камбалу, палтусу.

В Северной Атлантике проведено большое количество исследований влияния климата на численность поколений и состояние этих рыб, которые обобщены многими учеными [3–5, 12, 13, 19, 25–27, 30].

Современная эпоха в СВА может быть названа скумбриевой, так как такого роста запасов скумбрии не было в последние 60 лет. Ее уловы в 2010-е годы достигли 1,5 млн т. Скорее всего, эта эпоха продлится до 2025 г., пока зимний индекс скандинавского колебания дальней связи будет в положительной фазе. Именно это колебание создавало благоприятные условия для выживания урожайных поколений скумбрии в 2000-е годы. Одновременно оно формировало неурожайные поколения норвежской весенне-нерестующей сельди в Норвежском и Баренцевом морях.

Урожайность поколений крупного запаса путассу зависит от тепловых условий на ее нерестилищах, которые контролируются атлантической многодекадной осцилляцией (АМО), а также интенсивностью субарктического круговорота. В отрицательную фазу АМО, когда была высокая интенсивность круговорота, были бедные поколения и невысокие уловы путассу. В 1996–2005 гг., когда наступила положительная фаза АМО и снизилась интенсивность круговорота, появилась серия урожайных поколений, обеспечив рост запасов и вылов путассу 2,5 млн т в 2004 г. В связи с возрастанием интенсивности круговорота в 2006–2010 гг. вновь появились бедные поколения, а уловы путассу снизились в 2011 г. до 100 тыс. т. В 2014–2016 гг. появились урожайные поколения путассу из-за резкого потепления Арктики и СВА под влиянием Эль-Ниньо 2015–2016 гг. Однако новое похолодание в СВА с мая 2017 г., по-видимому, указывает на скорое

наступление отрицательной фазы АМО, усиление круговорота и бедные поколения путассу в 2020-е годы.

В этих холодных условиях ожидается новая мойвенная эпоха с частыми урожайными поколениями мойвы, как это было в 1970-е и 1980-е годы, когда ее уловы достигали 3 млн т. Это происходило при отрицательной фазе АМО в период роста индекса Северо-Атлантического колебания (САК). Мойвенная эпоха продолжалась до 1983 г., когда появилось первое урожайное поколение сельди после многолетней депрессии. Это поколение уничтожило урожайные поколения мойвы 1984 и 1985 г. [21]. Поскольку с 2004 по 2012 г. были в основном малоурожайные поколения сельди и ожидается, что так будет до середины 2020-х годов, у популяции мойвы Баренцева моря создаются благоприятные физические и биологические условия для выживания урожайных поколений и нового роста биомассы запаса до 7–8 млн т и уловов до 3,0 млн т.

Для крупнейшего в Мировом океане запаса трески баренцевоморской или северо-восточной арктической характерны квазидвадцатилетние уровни средней урожайности, которые хорошо коррелируют с фазами зимнего индекса АМО.

В периоды отрицательной фазы АМО уровни урожайности трески снижаются (1907–1925, 1971–1986 гг.) соответственно до 210 и 450 млн экз., а в первую половину положительной фазы в 1927–1947 гг. и в 1987–2003 гг. возрастают до среднего уровня, соответственно до 500 и 700 млн экз. В заключительной части положительной фазы и переходе индекса в отрицательную фазу происходит резкое возрастание среднего уровня урожайности до 750 млн экз. за счет появления серии рекордно урожайных поколений в 1950-е – 1970-е годы. С 2004 г. до 2025–2029 гг. происходит возрастание среднего уровня урожайности до 900 млн экз. Эти урожайные поколения появляются благодаря переходу индекса САК в отрицательную фазу и резкому уменьшению циклонической активности в районах нереста и дрейфа личинок [6, 7].

Резкое возрастание биомассы запаса трески потребует новой системы управления, в частности, резкого увеличения ее уловов до 1,5–2,0 млн т. С учетом динамики запасов пелагических и демерсальных видов в СВА в 2020-е годы общий вылов, возможно, поднимется до 10 млн т.

Другой крупный запас северной трески обитает в районе Лабрадора и Северной Ньюфаундлендской банки. В 1950-е и 1960-е годы здесь, как и в Баренцевом море, были частые урожайные поколения, которые обеспечивали высокую биомассу запаса и уловы до 0,8 млн т. В начале 1970-х годов из-за резкого похолодания и большой соленостной аномалии, а также перелова, произошло снижение урожайности поколения, и биомасса трески резко снизилась, как и ее уловы (рис. 10). В начале 1990 г. наступило новое резкое похолодание, которое привело к коллапсу запаса и очень бедным поколениям. Только после 2005 г. в 2007–2008 гг. и в 2014–2015 гг. начался рост урожайности поколений.

Совпадение по времени нового периода высокоурожайных поколений в Баренцевом море с 2004 г. и в СЗА после 2005 г. указывает на то, что, скорее всего, в предстоящие 2020-е годы этот запас трески будет восстанавливаться, поскольку здесь должны наступить теплые безледные годы, такие же, как в 1950-е и 1960-е годы

при снижении индекса САК в отрицательную фазу и перемещении центра Исландского минимума на запад из Баренцева и Норвежского морей.

Аналогичное увеличение запасов других демерсальных видов, а также мойвы должно быть в СЗА в 2020-е годы, а возможно, и в 2030-е годы. В целом экспертно общий улов в 21 районе в эти десятилетия должен возрасти до 3 млн т к 2030 г.

Центрально-восточная часть Атлантики – ЦВА (34 район) – является второй по рыбопродуктивности в этом океане после 27 района. Его рыбопродуктивность связана с прибрежными апвеллингами вдоль Северо-Западной Африки [2]. Уловы здесь с 1950 г. росли с 0,3 до 4,5 млн т. В 2015 г. выловлено 4,3 млн т. Уже к 1975 г. вылов превысил 3,5 млн т и затем с декадными колебаниями никогда не опускался ниже 2,5–3,0 млн т. Основу уловов здесь составляют пелагические рыбы, характерные для субтропических и тропических прибрежных апвеллингов:

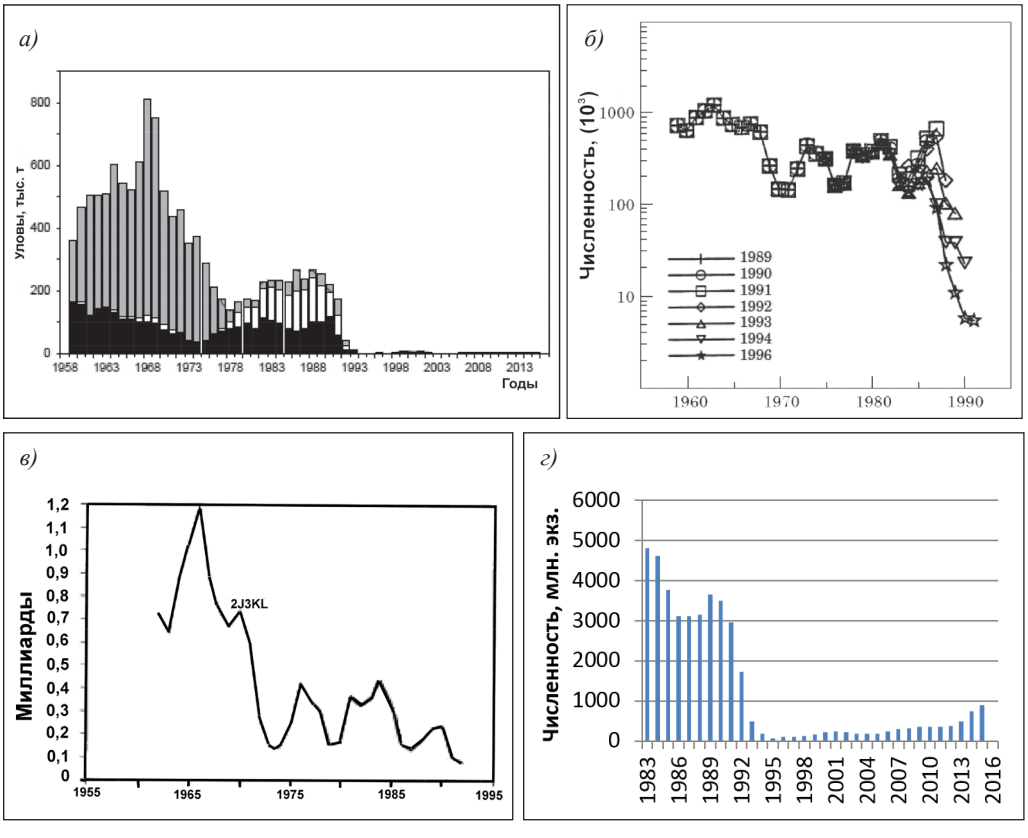

Рис. 10. *а* – уловы трески (тыс. т) в 1959–2015 гг.: черным цветом – канадский прибрежный лов, белым – канадский морской лов, серым – уловы других стран [28]; *б* – численность 3-летней трески (NAFO Divisions 2J3KL) по VPA; *в* – оценка годовых классов в возрасте 3 года в 1960–1993 гг.; *г* – численность молоди северной трески в возрасте 2+ в районе Лабрадора и Ньюфаундленда, 1983–2015 гг. [28]

сардина, ставрида, скумбрия, сардинелла и др., в том числе тунцы. По современному состоянию биоресурсов они не осваиваются полностью из-за искусственного занижения промысловых усилий. Можно ожидать, что в предстоящие десятилетия продолжатся декадные колебания уловов с тенденцией роста уловов до 5–6 млн т.

Юго-Восточная Атлантика – ЮВА (район 47) – с ее прибрежными апвеллингами менее рыбопродуктивна, чем ЦВА. Уже в конце 1960-х годов и в 1970-х уловы держались на уровне 3,0–3,3 млн т. К началу 1990-х годов они снизились до 1,7–1,8 млн т и остаются на этом уровне. Ставрида и хек являются самыми массовыми видами, их доля в уловах – 25 и 22 % соответственно. Состояние запаса южноафриканской сардины и анчоуса улучшилось в 2010-е годы в условиях современного жесткого управления промыслом. Ожидать увеличения уловов здесь не приходится, даже при росте запасов под влиянием климата. Вероятно, в ближайшие десятилетия сохранится улов на уровне 2 млн т.

В Центрально-Западной Атлантике – ЦЗА (район 31) – начиная с 2000 г. уловы снижаются. В 2010-е годы они достигали уровня 1,3–1,5 млн т, а в 2015 г. – 1,2 млн т. Одним из основных видов в уловах является мексиканский менхэден. Его выловы в середине 1980-х годов достигали 1,0 млн т. В последние годы они снизились до 0,5 млн т. В 1990-е годы были значительными уловы круглой сардинеллы, которая сейчас считается перелавливаемой.

С учетом прогнозируемого похолодания в 2020-е и 2030-е годы можно ожидать восстановления запаса мексиканского менхэдена и увеличения его уловов. Аналогичная ситуация может быть и с круглой сардинеллой. Можно предполагать, что в эти десятилетия уловы в районе возрастут до 2,0 млн т.

Юго-западная часть Атлантического океана – ЮЗА (41 район) – благодаря обширному шельфу южнее 40° ю. ш., а также интенсивному холодному Фолклендскому течению до некоторой степени аналогична СЗА. Массовыми объектами промысла являются: южная путассу, патагонская мерлуза, анчоус, макруронус и кальмар-иллекс. Последний является наиболее ценным объектом промысла. В период усиления Фолклендского течения в предстоящие десятилетия уловы сохранятся на уровне 2,5 млн т.

Таким образом, в отличие от Тихого океана, в Атлантическом океане в предстоящие десятилетия уловы сохранятся на уровне, близком к современному. В 2015 г. общие уловы в районах океана оценены ФАО в 20,5 млн т. В предстоящие десятилетия они, возможно, возрастут до 25 млн т.

3.4. Ожидаемые изменения запасов и уловов криля и рыб в Южном океане

В Южном океане (районы ФАО 48, 58, 88) имеются большие запасы таких массовых объектов, как миктофиды, антарктический криль, а также шельфовые и глубоководные рыбы, из которых наиболее ценным является клыкач.

Биомасса криля оценивается в 400–600 млн т. В связи с тем что с 2007 г. наступила климатоокеанологическая эпоха, благоприятствующая формированию концентраций, воспроизводству, росту запасов и хорошей доступности криля для промысла, уже с 2008 г. наметилась тенденция роста его уловов со 100 тыс. т

в 2007 г. до 280 тыс. т в 2014 г. Высокая востребованность криля для развития аквакультуры и для питания позволяет предполагать, что в 2020-е и 2030-е годы его уловы возрастут до 1,0–1,5 млн т при соответствующем увеличении промысловых усилий, в том числе со стороны Российской Федерации.

Заключение

Оценки тенденции изменения уловов массовых объектов промысла в Мировом океане под влиянием возможного относительного похолодания климата в 2020-е и 2030-е годы по промысловым районам ФАО свидетельствуют о том, что в эти годы мировой уровень уловов превысит 90 млн т, в основном благодаря росту запасов в наиболее продуктивных районах океана в СЗТО, СВА, ЦЗТО и в восточной части Индийского океана (ВИО). В 2030-е годы благодаря очередной сардинной эпохе в Тихом океане мировой уровень уловов может повыситься до 95 млн т. В эти десятилетия сохранится тренд на увеличение уловов тунцов и головоногих моллюсков. В связи с формированием в Южном океане благоприятных условий для роста запасов антарктического криля его уловы возрастут до 1,0–1,5 млн т в 2020–2030-е годы.

Литература

1. *Булатов О.А., Котенев Б.Н., Кровнин А.С.* О перспективах новой «сардинной эпохи» в северо-западной части Тихого океана // Вопросы рыболовства. 2016. Т. 17, № 4. – С. 385–405.
2. *Духова Л.А., Сапожников В.В.* Гидрохимические показатели первичной продукции в зоне Перуанского и Канарского апвеллингов // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. – С. 85–100.
3. *Ижевский Г.К.* Океанологические основы формирования промысловой продуктивности морей. – М.: Пищепромиздат, 1961. – 216 с.
4. *Ижевский Г.К.* Системная основа прогнозирования океанологических условий и воспроизводства промысловых рыб. – М.: Изд-во ВНИРО, 1964. – 166 с.
5. *Кляшторин Л.Б., Любушин А.А.* Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. – М.: Изд-во ВНИРО, 2005. – 235 с.
6. *О влиянии* крупномасштабной изменчивости атмосферы-океана на урожайность поколений трески Баренцева моря / Б.Н. Котенев, А.С. Кровнин, Н.В. Мордасова, Г.П. Мурый // Вопросы промысловой океанологии. 2013. Вып. 10. – С. 26-65.
7. *О будущем* состоянии популяций массовых гидробионтов в биопродуктивных районах Мирового океана / Б.Н. Котенев, А.С. Кровнин, В.В. Масленников, Н.В. Мордасова // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. – С. 209–248.
8. *Масленников В.В.* Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. – М.: Изд-во ВНИРО, 2003. – 295 с.
9. *Масленников В.В.* Колебания температуры воды в тихоокеанском секторе Антарктики и процессы Эль-Ниньо – Ла-Нинья // Вопросы промысловой океанологии. – 2011. Вып. 8, № 2. – С. 122–133.
10. *Моисеев П.А.* Биологические ресурсы Мирового океана. – М.: Агропромиздат, 1989. – 368 с.
11. *Науменко Н.И.* Биология и промысел морских сельдей Дальнего Востока. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2001. – 330 с.
12. *Ожигин В.К., Третьяк В.Л., Ярагина Н.А., Ившин В.А.* Океанографические условия Баренцева моря и их влияние на выживание и развитие молоди северо-восточной арктической трески. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1999. – 88 с.
13. *Треска* Баренцева моря: биология и промысел / В.Д. Бойцов, Лебедь Н.И., Пономаренко И.Я. и др. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. – 206 с.

14. *Тюрин Б.В.* О причинах снижения запасов охотской сельди и мерах по их восстановлению // Биология моря. 1980. № 2. – С. 69–74.
15. *ФАО.* Состояние мирового рыболовства и аквакультуры. Вклад в обеспечение всеобщей продовольственной безопасности и питания. – Рим, 2016. – 216 с.
16. *Изменения* климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин / И.Е. Фролов, З.М. Гудкович, В.П. Карклин, В.М. Смоляницкий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). – С. 52–61.
17. *Шунтов В.П., Темных О.С.* 2011. Тихоокеанские лососи в морских и океанических системах: монография. – Владивосток: ТИНРО-Центр. – Т. 2. – 473 с.
18. *Alekseev A.P., Kudlo B.P, Yakovlev V.N., Fedoseyev A.F., Barinov A.A.* 1972. Some Aspects of Water Circulation in the Northwest Atlantic in 1960-69. International Commission for the Northwest Atlantic Fisheries. Special Publication, 8. Dartmouth, N.S. Canada. – P. 149 – 163.
19. *Barrange M., Field J., Harris R, Hofmann E., Perry R, Werner F.* (Eds) 2010. Marine Ecosystem and Global Change. Oxford. University Press. – 412 p.
20. *Boitsov V.D., Karsakov A.L., Trofimov A.G.* 2012 Atlantic water temperature and climate in the Barents Sea 2000–2009 // ICES Journal of Marine Science, 69 (5). – P. 833–840.
21. *Hamre J.* 1991. Interrelation between environmental changes and fluctuating fish populations in Barents Sea. In: Long-term variability of Pelagic fish Populations and their Environment, pp. 259-270. Ed. by Kawasaki T., Tanaka S., Toba Y., Taniguchi A. Pergamon Press. Oxford.
22. *Hare S.R., N.J. Mantua.* 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. Progress in Oceanography. Vol. 47. – P. 103–145.
23. *Khen G.V., Basyuk E.O., Vanin N.S., Matveev V.I.* 2013. Hydrography and biological resources in the western Bering Sea // Deep-Sea Research II. V. 94. – P. 106–120.
24. *Report* of the Arctic Fisheries Working Group (AFWG), 23–29 April 2015, Hamburg, Germany / ICES CM 2015/ACOM:05. – 2015. – 590 p.
25. *Sherman K., Skjoldal H.* (Eds). 2002. Large Marine Ecosystems of the North Atlantic. Changing States and Sustainability. Elsevier. – 465 p.
26. *Skjoldal H.R.* (Ed.) 2004. The Norwegian Sea Ecosystem. Tapir Academic Press. – 559 p.
27. *Stenseth N., Ottersen G., Hurrell, Belgrano A.* (Eds.) 2004. Marine Ecosystems and Climate Variation. Oxford. University Press. – 252 p.
28. *Stock* Assessment of northern cod (NAFO DIVS. 2J3KL) in 2016.Canadian Science Advisory Secretariat. Science Advisory Report 2016/026. Newfoundland and Labrador Region, 1–17 pp.
29. *Templeman W.* 1972. Year-Class Success in some north Atlantic Stocks of cod and Haddock // ICNAF Special Publication No 8. Symposium on environmental conditions in the northwest Atlantic 1960–1969. Dartmouth, N.S. Canada. – P. 223–238.
30. *The Barents* Sea. 2011. Ecosystem, Resources, Management. Ed. By Jacobson T., V.K. Ozhigin. Tapir Academic Press. 825 p.
31. *Tisdale B.* 2015. On Global Warming and the Illusion of Control. Part I. 682 p. Accessible via: https://bobtisdale.fales.wordpress.com. 15.09.2016.

УДК 551.465.63:[551.463.8+551.464.34+551.464.38](261.24)«450.1»

В.А. Кречик, М.В. Капустина*, Е.С. Бубнова*, В.А. Гриценко***

АБИОТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИДОННЫХ ВОД ГДАНЬСКОЙ ВПАДИНЫ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2016 ГОДУ

* Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, myemail.gav@gmail.com;
** Балтийский федеральный университет им. И. Канта, gritsenko_vl@mail.ru

V.A. Krechik, M.V. Kapustina, E.S. Bubnova, V.A. Gritsenko

ABIOTIC CONDITIONS OF BOTTOM WATERS IN THE GDANSK DEEP OF THE BALTIC SEA IN 2016

В статье выполнены описание и анализ изменчивости основных абиотических факторов – температуры, солености, содержания кислорода и концентрации взвеси – для придонных вод Гданьской впадины Балтийского моря на основе данных контактных измерений 2003–2016 гг. Анализ данных показал рост интенсивности водообмена с Северным морем в 2015–2016 гг., который нашел отражение в повышении значений термохалинных показателей и содержания растворенного кислорода в придонном слое Гданьской впадины. Концентрация взвешенного вещества не показала какой-либо значимой зависимости от изменчивости других абиотических параметров. Полученные оценки позволяют подтвердить решающую роль адвективного фактора для экологического благополучия придонных вод глубоководных впадин Балтийского моря и могут быть востребованы при выполнении различного рода прогнозов эволюции придонных сообществ или процессов.

Ключевые слова: *Балтийское море, Гданьская впадина, термохалинная структура, содержание кислорода, концентрация взвеси, затоки, сероводородное загрязнение.*

In this article we give a description and analysis of the variability of the main abiotic factors – temperature, salinity, oxygen content and concentration of suspended matter for bottom waters of the Gdansk basin of the Baltic sea on the basis of the contact data from 2003 to 2016 years. An analysis of the total data set showed the intensification of water exchange with the North Sea in 2015–2016 reflected in the temperature, salinity and dissolved oxygen concentration increase in the bottom layer of the Gdansk deep. The concentration of suspended matter did not show any significant dependence on the variability of other abiotic parameters. The obtained estimates make it possible to support the leading role of the advective factor for the ecological state of the Baltic Sea deeps bottom water and they may be used to perform various kinds of predictions of the evolution of near-bottom communities or processes.

Keywords: *Baltic sea, Gdansk deep, thermohaline structure, dissolved oxygen, suspended matter, inflows, hydrosulphuric pollution.*

Введение

Хорошо известно, что Балтийское море имеет две основные структурные гидрологические зоны – поверхностную, распресненную речным стоком и осадками, и глубинную, термохалинные параметры которой формируют затоки североморских вод и процессы зимней конвекции в северной части моря. Известно также [4], что на экологию поверхностного слоя свое негативное влияние оказывают различного рода загрязнения, поступающие с речным стоком, осадками, а также

в процессе хозяйственной деятельности. Одним из проявлений экологического неблагополучия поверхностного слоя Балтики стали процессы эвтрофикации, проявляющиеся в массовом цветении водорослей на обширных участках поверхности моря. Эти процессы сегодня находятся в фокусе внимания исследователей и относительно хорошо изучены и описаны в научной литературе [5].

Экологическое же благополучие глубинных слоев моря прямо связано с одним из важнейших режимообразующих факторов формирования гидрологических условий всего Балтийского моря – водообменом с Северным морем. Известно [1], что в условиях отсутствия адвективного поступления североморских вод придонный слой Гданьской впадины подвержен стагнации, спорадически порождающей образование бескислородных зон и появление очагов сероводородного заражения придонных вод. Соленость, температура, растворенный кислород и концентрация взвешенного осадочного вещества являются абиотическими факторами, определяющими структуру и функционирование водных экосистем, а также седиментационные условия в придонном слое [2].

Целью работы стало описание внутригодовой изменчивости основных абиотических факторов придонных вод в Гданьской впадине Балтийского моря на протяжении 2016 г.

Материалы и методы

В 2016 г. Атлантическим отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН было выполнено 7 рейсов научно-исследовательских судов «Профессор Штокман», «Академик Мстислав Келдыш» и «Академик Николай Страхов» в акваторию Гданьской впадины в пределах исключительной экономической зоны (ИЭЗ) РФ. На станции 22 мониторинговой сети нефтяного месторождения «Кравцовское» (рис. 1) в ходе экспедиций были получены значения температуры и солености мультипараметрическими зондами Idronaut Ocean Seven 316 Plus и Sea & Sun Tech CTD90M. Также были измерены значения содержания растворенного кислорода и взвешенного вещества. Кислород определялся классическим объемным методом йодометрического титрования по Винклеру. Взвешенное осадочное вещество выделялось из воды методом ультрафильтрации под давлением 0,4 бар через фильтры с диаметром пор 0,45 мкм.

Обсуждение результатов

Как было отмечено выше, при продолжительном отсутствии интрузий североморских вод, называемых также «большими затоками», в придонных слоях Балтики происходит уменьшение содержания растворенного кислорода и интенсивное перераспределение соединений фосфора и азота из донных отложений в воду. С 80-х годов прошлого века и вплоть до первой декады 2000-х годов количество затоков уменьшилось с 5–7 за декаду до одного [8]. В декабре 2014 г. был зафиксирован первый за декаду большой заток [9]. С ноября 2015 по октябрь 2016 г., по данным Федерального агентства морского судоходства и гидрографии, предоставляющего данные с измерительных станций, входящих в сеть мониторинга окружающей среды (MARNET), в западной части Балтийского моря отмечалось неоднократное повышение солености придонных вод. В частности, в период с ноября

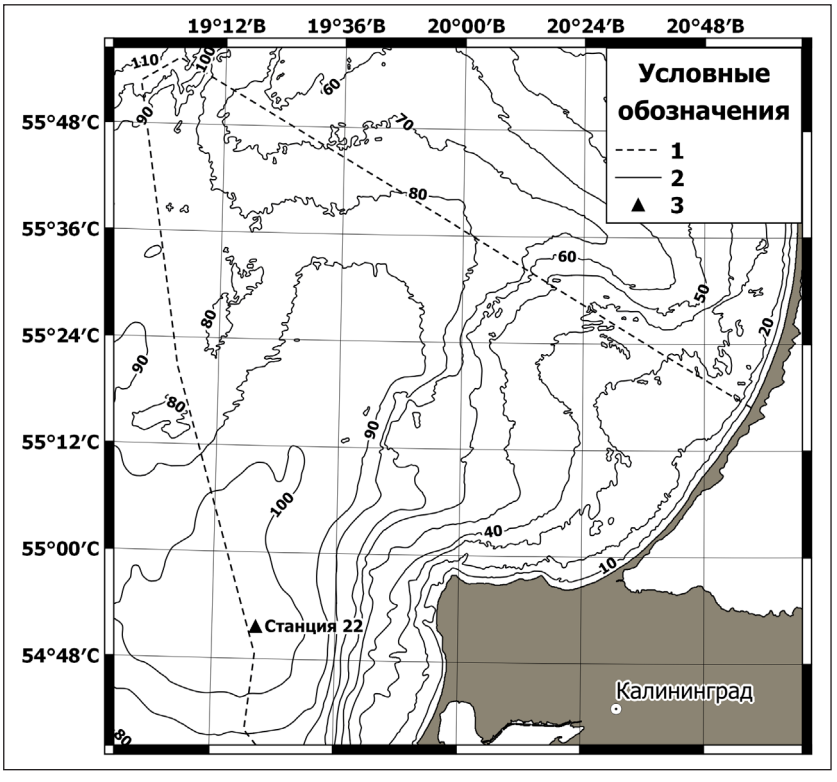

Рис. 1. Рельеф дна и очертания береговой линии в районе Гданьской впадины Балтийского моря: *1* – граница ИЭЗ РФ; *2* – изобаты (проведены через 10 м); *3* – станция 22 мониторинговой сети месторождения «Кравцовское» в Балтийском море

2015 г. по январь 2016 г. и с середины февраля по март 2016 г. на станции, находящейся в Арконском бассейне (54° 53' с. ш., 13° 52' в. д.), был отмечен неоднократный рост значений солености с 14 до 21 psu. Следующий период, когда значения солености достигали 18–20 psu, пришелся на середину августа – середину октября 2016 г. На рис. 2 приведен ход солености придонных вод в Арконской котловине на станции Аркона мониторинговой сети MARNET за 2015–2016 гг., построенный на основе данных, предоставленных Немецким центром океанографических данных [BSH/DOD (M41, соглашение 2518/2016-075)].

Анализ хода солености в Арконском бассейне и Гданьской впадине показал, что для их придонных слоев характерна разница во времени наступления экстремумов данного параметра. Это смещение зависит от величины и интенсивности конкретного затокового события и в 2016 г. составило в среднем 3 месяца. Такое значение вполне соответствует полученным ранее оценкам в 2–4 месяца [10, 11].

Для понимания общих особенностей изменчивости термохалинных показателей, концентрации взвешенного вещества и растворенного кислорода в придонном слое Гданьской впадины был изучен ход абиотических факторов за период

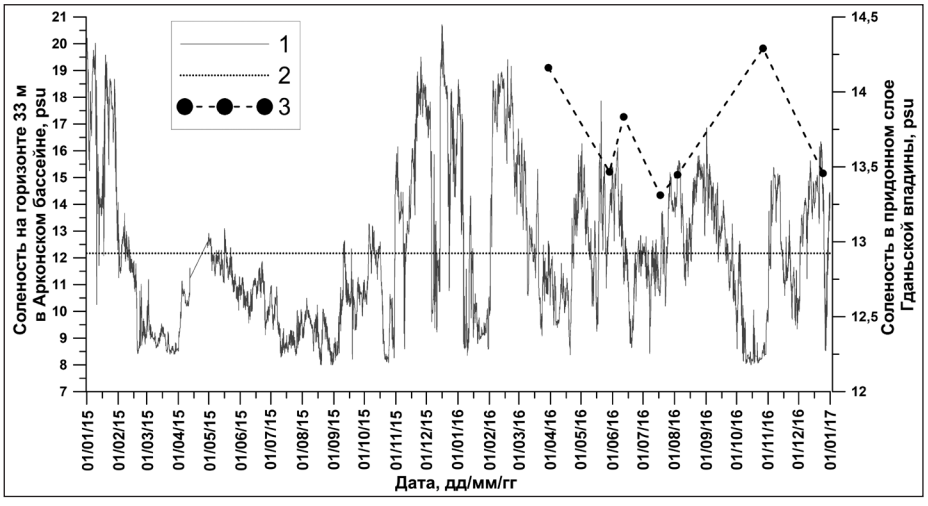

Рис. 2. Ход солености придонных вод в 2015–2016 гг. в Арконском бассейне и Гданьской впадине. Соответствующий тип линий, приведенных на рисунке: *1* – ход солености на горизонте 33 м в Арконском бассейне; *2* – средняя соленость на горизонте 33 м в Арконском бассейне за период 01.01.2015–01.01.2017 гг.; *3* – ход солености в придонном слое на станции 22 (Гданьская впадина Балтийского моря)

с мая 2003 г. по декабрь 2016 г. Соответствующие графики, построенные по данным CTD-измерений на станции 22, приведены на рис. 3.

Ход солености придонного слоя в период 2003 – начало 2004 г. характеризуется довольно высокими значениями (13,3 psu), являющимися последствием мощного затока 2003 г. Позднее произошло снижение значений на 0,8–1 psu. Следующий пик наблюдался в марте 2007 г. В период 2008–2014 гг. соленость снизилась до 11,1–12 psu. Резкий подъем солености до значения 14,2 psu происходит в начале 2015 г. и является проявлением одного из сильнейших затоковых событий в истории наблюдений [8].

Ход значений температуры во многом повторяет ход солености. Коэффициент корреляции этих двух рядов составляет 0,35 (см. рис. 3, *а*). На графиках отчетливо видны периоды повышения солености и температуры в 2003, 2006, 2007 и 2015–2016 гг.

Концентрация взвешенного вещества за исследуемый период изменялась скачкообразно и не демонстрировала какой-либо значимой зависимости от других абиотических параметров. Максимальный коэффициент корреляции ряда значений взвеси наблюдался со значениями температуры и составил 0,24. С 2003 по 2016 г. можно выделить девять локальных максимумов концентрации взвеси со значением больше 1,13 мг/л, при этом три из них приходятся на 2015–2016 гг. (см. рис. 3, *б*).

Изменение содержания растворенного в воде кислорода носило квазипериодический характер – максимумы фиксировались в весенний период и ранней осенью, минимальные значения были характерны для лета, а также измерений, выполненных поздней осенью и зимой. Временной ход этого параметра можно условно

разделить на три периода. Для первого, продолжавшегося до марта 2007 г., было характерно значительное содержание кислорода. Среднее значение за это время составило 2,02 мл/л. С июля 2007 г. по октябрь 2014 г. содержание растворенного кислорода снизилось до 0,36–0,51 мл/л. Среднее значение в этот промежуток

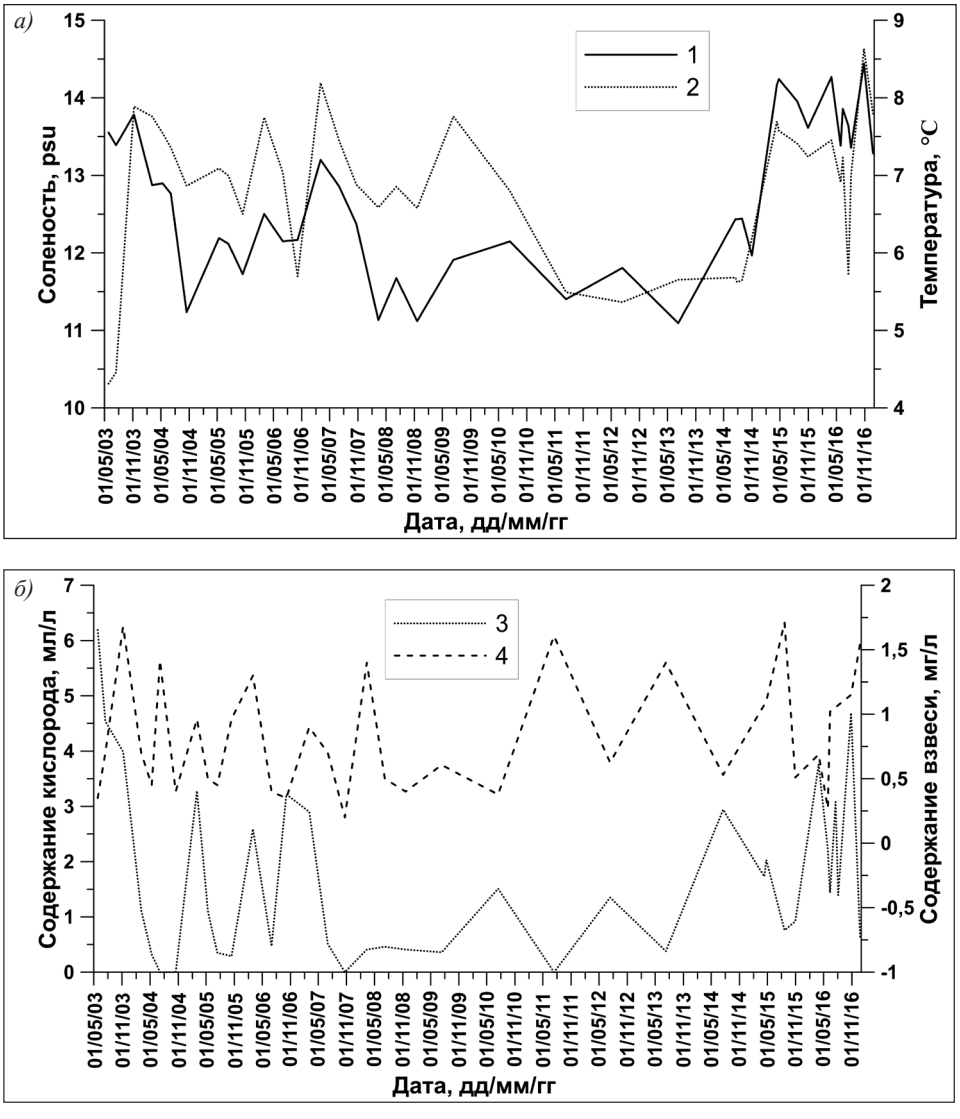

Рис. 3. Ход абиотических показателей в придонном слое Гданьской впадины Балтийского моря за период 2003–2016 гг.: *а* – солености и температуры; *б* – концентраций растворенного кислорода и взвешенного вещества. Соответствие типа и содержания линий, приведенных на рисунке: *1* – ход солености; *2* – ход температуры; *3* – ход концентрации растворенного кислорода; *4* – ход концентрации взвешенного вещества

времени составляло 0,76 мл/л. Третий период, когда среднее значение содержания растворенного кислорода снова увеличилось до 2,06 мл/л, начался весной 2015 г. За время мониторинговых наблюдений с 2003 по 2016 г. было зафиксировано четыре случая полного отсутствия кислорода в придонных водах. Очевидно, что данное обстоятельство неминуемо приводило к ухудшению экологической обстановки в придонном слое Гданьской впадины. Результаты количественных оценок временных рядов абиотических параметров придонных вод в районе исследования методом описательной статистики приведены в таблице.

Основные статистические характеристики абиотических параметров придонных вод Гданьской впадины Балтийского моря по данным натурных измерений за период 2003–2016 гг.

Статистический показатель	Значение температуры, ºС, и дата наблюдения	Значение солености, psu, и дата наблюдения	Значение содержания кислорода, мл/л, и дата наблюдения	Значение содержания взвеси, мг/л, и дата наблюдения
Максимум	8,63; 27.10.2016 г.	14,44; 27.10.2016 г.	6,19; 27.05.2003 г.	1,71; 21.08.2015 г.
Верхний квартиль	7,50	13,47	2,90	1,13
Медиана	6,99; 04.08.2016 г.	12,50; 02.03.2006 г.	1,12; 05.03.2004 г.	0,69; 30.03.2016 г.
Нижний квартиль	5,95	12,04	0,41	0,43
Минимум	4,31; 27.05.2003 г.	11,09; 10.07.2013 г.	0,00; 05.07.2004 г. 15.10.2004 г. 21.10.2007 г. 13.07.2011 г.	0,20; 21.10.2007 г.
Среднее арифметическое	6,79	12,71	1,66	0,81

Полученные оценки позволяют еще раз подтвердить решающую роль адвективного фактора для экологического состояния придонных вод глубоководных впадин Балтийского моря. В условиях притока вод из западной части моря содержание растворенного кислорода скачкообразно повышается одновременно с увеличением солености и температуры воды. Изменчивость концентрации взвешенного вещества не показала сколько-нибудь выраженной зависимости от других исследуемых параметров. Известно [6], что экстремум концентрации взвеси в придонном слое Гданьской впадины состоит исключительно из неживых и минеральных частиц. Таким образом, количество взвеси в придонных водах зависит в первую очередь от скорости придонных течений, а не от физических свойств воды [7].

Зафиксированная при мониторинговых наблюдениях интенсификация водообмена с Северным морем в 2015–2016 гг. [3] привела к изменению значений абиотических показателей придонного слоя Гданьской впадины в пределах ИЭЗ РФ (рис. 4).

Выполненные в акватории Гданьской впадины измерения показали, что термохалинные параметры в 2016 г. претерпели значительные изменения и превышали среднемноголетний уровень. В частности, годовой ход температуры в придонном слое можно разделить на три периода. Первый, длившийся с марта по июль,

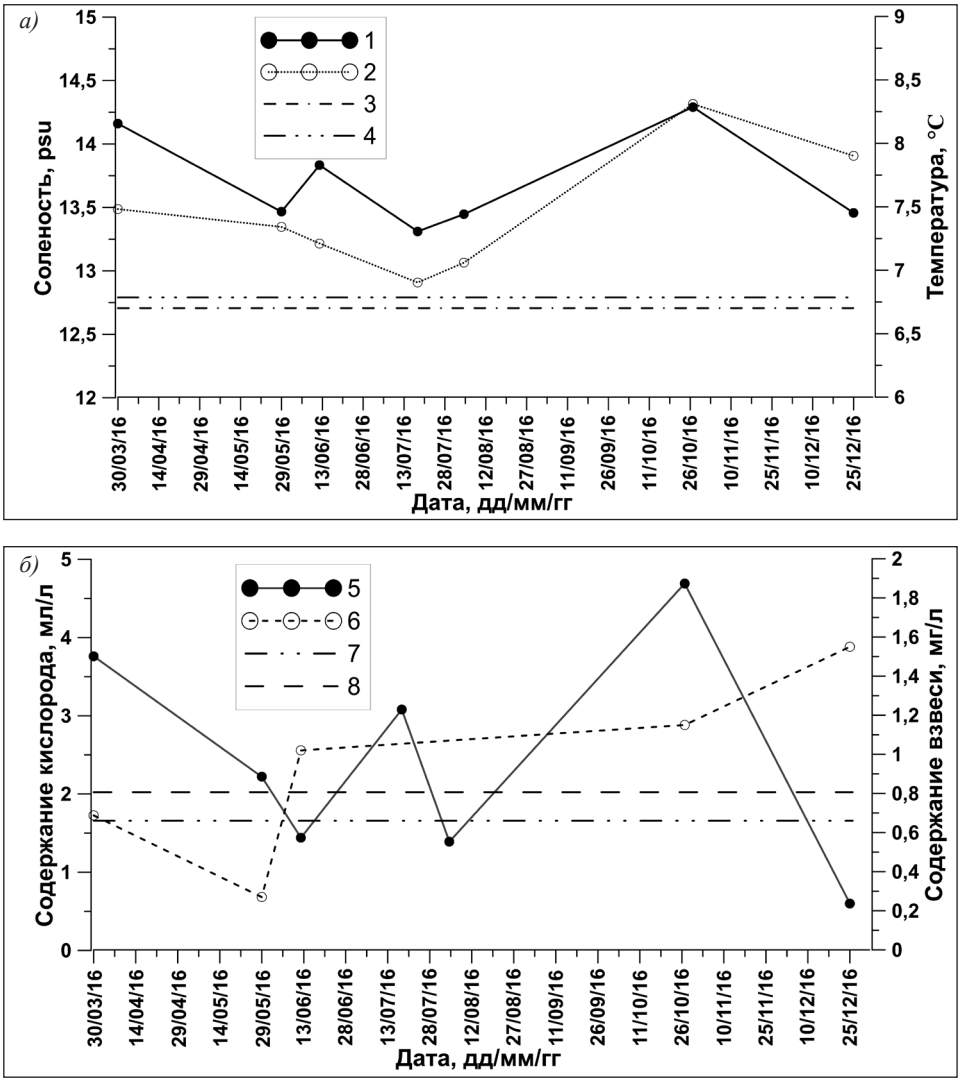

Рис. 4. Ход абиотических показателей в придонном слое Гданьской впадины в 2016 г.: *а* – солености и температуры; *б* – концентраций растворенного кислорода и взвешенного вещества на фоне средних значений тех же параметров за весь период наблюдений. Соответствие типа и содержания линий, приведенных на рисунке: *1* – ход солености; *2* – ход температуры; *3* – средняя соленость за период май 2003 г.–декабрь 2016 г.; *4* – средняя температура за период май 2003 г.–декабрь 2016 г.; *5* – ход концентрации растворенного кислорода; *6* – ход концентрации взвешенного вещества; *7* – средняя концентрация растворенного кислорода за период май 2003 г.–декабрь 2016 г.; *8* – средняя концентрация взвешенного вещества за период май 2003 г.–декабрь 2016 г.

характеризовался ее снижением с 7,48 до 6,90 °С. С июля до конца октября, когда было зафиксировано максимальное значение (8,31 °С), наблюдалось увеличение значений параметра. К концу года последовало падение температуры на 0,4 °С.

Ход солености в целом был подобен ходу температуры. Исключением является июнь, когда соленость повышается на 0,4 psu при снижении температуры. Среднегодовое значение составляет 13,7 psu. Максимум солености, температуры и содержания растворенного кислорода наблюдался в конце октября.

Изменение содержания растворенного кислорода придонных вод в 2016 г. имело квазипериодический характер, а его средний показатель оказался выше среднего уровня за весь период мониторинга на 0,8 мл/л. Годовая изменчивость этого параметра практически идентична ходу солености. Корреляция между двумя рядами составляет 0,68. Однако на графике выделяется один пик (12 июня), когда два значения разнонаправлены. Это, по-видимому, связано с тем, что измерения были выполнены в то время, когда Гданьскую впадину заполняла «старая» вода, вытесненная из глубинных слоев Борнхольмской впадины североморской водой.

Концентрация взвешенного осадочного вещества за 2016 г. изменялась по двум векторам: в первых двух кварталах наблюдалось уменьшение значения параметра до 0,27 мг/л в мае, а с конца июня концентрация взвеси испытывала стабильный рост до 1,55 мг/л в декабре.

Выводы

Анализ выполненных в 2016 г. инструментальных измерений ряда абиотических параметров придонных вод Гданьской впадины показал, что диапазон измеренных значений солености составил 13,31–14,44 psu, температуры – 6,90–8,63 ºС. Концентрация кислорода изменялась от 0,60 до 4,69 мл/л, а концентрация взвеси – от 0,27 до 1,55 мг/л. Максимум всех абиотических показателей, кроме взвеси, наблюдался в конце октября. Концентрация взвеси достигла максимального значения к концу года. Минимум температуры и солености зафиксирован в июле, растворенного кислорода – в декабре, а концентрации взвешенного вещества – в мае.

Среднегодовые значения всех исследуемых параметров были выше их средних значений за весь период наблюдений – с мая 2003 г. по декабрь 2016 г. В частности, средняя соленость увеличилась на 1 psu, или 8 %, от среднемноголетнего значения, температура – на 0,66 °С (9,8 %), концентрация растворенного кислорода – на 0,79 мл/л (48 %), а взвешенного осадочного вещества – на 0,13 мг/л (16,5 %). Сопоставление данных натурных измерений показало различие в природе изменчивости термохалинных параметров и взвеси.

Исследование изменчивости абиотических показателей придонных вод Гданьской впадины подтвердило, что наступление благоприятных, с точки зрения геоэкологического благополучия, условий происходило после больших затоков североморских вод. Отсутствие больших затоков в период с 2003 по 2014 г. четыре раза приводило к полному исчезновению кислорода в придонных водах впадины. При интенсификации водообмена с Северным морем в 2016 г. среднегодовое содержание растворенного кислорода выросло до 2,45 мл/л, что значительно превышает необходимое для нормального функционирования донных сообществ.

Исследование выполнено при частичной поддержке госзадания «Изменения геологической среды шельфовых морей бассейна Атлантического океана под влиянием антропогенной нагрузки» (№ 0149-2016-0003). Авторы выражают благодарность ООО «Лукойл-КМН» (г. Калининград) за помощь в организации процесса получения данных, а также Немецкому океанографическому центру данных (DOD) и Федеральному морскому и гидрографическому агентству (BSH) за предоставление гидрологических данных мониторинговой сети MARNET (соглашение 2518/2016-075).

Литература

1. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Т. 03. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия: справочник. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 451 с.
2. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей. Т. 03. Балтийское море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности: справочник. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. – 435 с.
3. *Кречик В.А., Капустина М.В., Дубравин В.Ф.* Современное состояние придонного слоя Гданьской впадины вследствие влияния больших затоков в 2015–2016 годах // Тр. V Балт. морск. форума всерос. науч. конф. «Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов», 23–24 мая 2017 г., Калининград. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. – С. 188–192.
4. *Музалевский А.А., Карлин Л.Н.* Экологические риски: теория и практика. – СПб.: РГГМУ, ВВМ, 2011. – 448 с.
5. *Ярвекюльг А.А., Гуделис В.К., Калейс М.В. и др.* Проблемы эвтрофикации Балтийского моря // Проблемы иссл. и матем. моделир. экосистемы Балтийского моря. Межд. проект «Балтика». Вып. 4. Основные тенденции эволюции экосистемы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – С. 61–149.
6. *Bełdowski J., Bełdowska M., Kuliński K., Darecki M*. Vertical mercury, cadmium and lead distribution at two stratified stations in the Southern Baltic Sea // Heavy Metals in the Environment. Maralte Books, 2012. – P. 237–256.
7. *Lund-Hansen L.C. & Skyum P*. Changes in hydrography and suspended particulate matter during a barotropic forced inflow // Oceanologica Acta. 1992. Vol. 15, No. 4. – P. 339–346.
8. *Mohrholz V., Naumann M., Nausch G., Krüger S., Gräwe U.* 2015. Fresh oxygen for the Baltic Sea. An exceptional saline inflow after a decade of stagnation // Journal of Marine Systems. 2015. Vol. 148. – P. 152–166.
9. *Naumann M., Mohrholz V., Nausch G*. Baltic inflow of December 2014 [Электронный ресурс] // The Leibniz Institute for Baltic Sea Research. [Официальный веб-сайт]. URL: http://www.io-warnemuende.de/baltic-inflow-of-december-2014.html (дата обращения: 10.04.2017).
10. *Piechura, J. and A. Beszczynska-Möller*, 2003: Inflow waters in the deep regions of the southern Baltic Sea – transport and transformation // Oceanologia. 2003. Vol. 45. – P. 593–621.
11. *Rak D*. The inflow in the Baltic Proper as recorded in January-February 2015 // Oceanologia. 2016. Vol. 58. – P. 241–247.

УДК 504.61:627.2:[662.6:552.74]:551.463.8(265.54)

А.А. Лебедев*, О.А. Тихонова*, Я.Ю. Блиновская*, В.В. Чайка*, А.В. Кирьянов*, Н.К. Христофорова*, К.С. Пикула*, В.П. Шевченко**, К.С. Голохваст*

ВЛИЯНИЕ УГОЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА НА СОСТАВ МОРСКИХ ВЗВЕСЕЙ ЗАЛИВА НАХОДКА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

* Дальневосточный федеральный университет, blinovskaya@hotmail.com;
** Институт океанологии им. П.П. Ширшова

A.A. Lebedev, O.A. Tikhonova, Ya.Yu. Blinovskaya, V.V. Chaika, A.V. Kirianov, N.K. Khristophorova, K.S. Pikula, V.P. Shevchenko, K.S. Golokhvast

COAL TERMINAL IMPACT ON MARINE SUSPENTION COMPOSITION: NAKHODKA GULF (JAPAN SEA)

В статье приводятся первые результаты исследования размерного состава морских взвесей в заливе Находка (Японское море) с помощью лазерной гранулометрии и масс-спектрометрии высокого разрешения. Показано, что среднеарифметический диаметр частиц взвеси залива Находка находился в интервале от 2,44 до 925,67 мкм. Качественный анализ частиц морской взвеси показал наличие частиц угля. Стоит отметить, что доля угольных частиц в воде залива Находка составляет от 7 % (вдали от терминала) до 53 % (ближайшая к терминалу точка). Нарастание доли угольных частиц в дальнейшем может привести к гибели морской биоты. Сделан вывод о необходимости усиления контроля за выполнением природоохранных мероприятий предприятиями угольной отрасли.

Ключевые слова: *залив Находка, Японское море, морские взвеси, угольная пыль, загрязнение.*

The first results of marine suspention dimentional composition in Nakhodka gulf (Japan sea) are adduce made with lazer grading and high resolution mass-spectrometry. It's shows up that midi-arithmetical marine suspention particles diameter is in an interval from 2,44 to 925,67 mkm. Quality analysis of marine suspention shows coal particle. Share of coal particles amount from 7 % (far from terminal) to 53 % (closest point from terminal). Accrual of coal particles in the future can become reason of marine biota death. The inference has been made about necessity to increase control of environmental safety measures on coal terminal.

Keywords: *Nakhodka gulf, Japan Sea, marine suspention, coal dust, pollution.*

Введение

Экологическое состояние акватории Японского моря изучается достаточно активно [1, 3, 4]. Выделяется залив Находка как место расположения крупного угольного терминала – порте Восточный, грузооборот которого в 2014 г. составил 21,84 млн т. Как показали результаты исследований [5–8], отмечается негативное влияние угольных терминалов на морскую акваторию.

Несмотря на важное экономическое значение угольного терминала, а в случае города Находка и поселка Врангель это одно из крупнейших градообразующих предприятий, необходимо оценить его влияние на качество морской среды.

Данная работа посвящена исследованиям гранулометрического и вещественного состава взвесей морской акватории вблизи угольного терминлаа порта Восточный в заливе Находка.

Методика отбора проб и анализа

Отбор проб проводился в мае (1-й отбор), августе (2-й отбор) и октябре (3-й отбор) 2014 г. Всего было отобрано 66 проб из 11 точек. Отбор проб осуществлялся в юго-восточной части залива Находка (бухты Врангеля и Козьмина) с помощью батометра (рис. 1). Полученный материал помещался в 1,5-литровые пластиковые стерильные контейнеры. Пробы отбирались в штиль, температура морской воды составляла от +20 до +23 °С.

Для оценки проб использован комплексный метод исследования частиц морской взвеси, включающий в себя лазерную гранулометрию, сканирующую электронную микроскопию с энергодисперсионным анализом.

Исследования проводились с использованием оборудования ЦКП «Межведомственный центр аналитического контроля состояния окружающей среды» ДВФУ.

Для лазерной гранулометрии из каждого образца проб набирали 60 мл жидкости и анализировали на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 NanoTec (Fritsch, Germany), позволяющем в ходе одного измерения устанавливать распределение

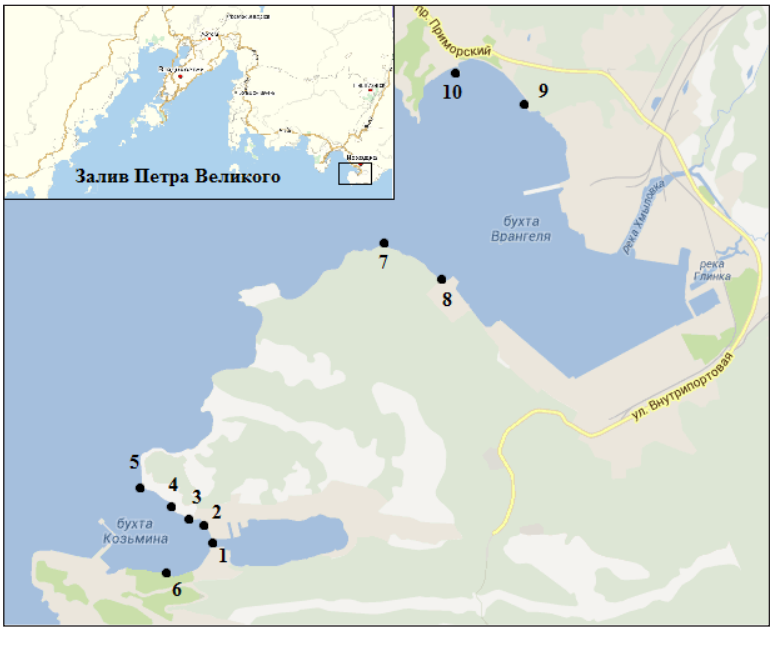

Рис. 1. Карта-схема отбора проб в юго-восточной части залива Находка: *1* – канал в озеро Второе; *2* – кут Козьмино; *3* – кекуры Бакланьи; *4* – скалы напротив терминала; *5* – навигационный знак; *6* – бухта Врангеля, строящийся пирс; *7* – мыс Петровского; *8* – рифы п/д угольным пирсом; *9* – пирс гидрографии; *10* – мыс Красный

частиц по размерам, а также определять их форму и ряд морфометрических параметров. Измерения проводились в режиме «nanotec» с установками «carbon/water 20 °C».

Вещественный анализ взвесей проводили на световом микроскопе SMZ1000 (Nikon, Japan) и сканирующем электронном микроскопе S-3400N (Hitachi, Japan) с энергодисперсионным спектрометром Ultra Dry (Thermo Scientific, USA).

Результаты и их обсуждение

Электронная микроскопия позволила оценить фракционный состав морских взвесей (табл. 1). Анализ полученных данных показал, что достоверные сезонные различия в размере и фракционном составе взвесей не установлены. В ряде точек отбора встречены частицы размером в единицы микрометра (рис. 2).

В этих же районах при втором и третьем отборах (в августе и октябре соответственно) среднеарифметический размер частиц менялся в пределах порядков.

Качественный состав частиц проведен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ELEMENT XR. Результаты анализа приведены в табл. 2, многократных превышений содержания тяжелых металлов в водорастворимой фазе не выявлено.

Следует отметить, что анализ проб донного грунта дает иной результат, поскольку было выявлено повышенное содержание частиц угля в морской воде, которые могут легко сорбировать на своей поверхности многие тяжелые и редкоземельные металлы (рис. 3). Содержание угольных частиц в отобранных материалах оценено по их доле среди общего числа частиц (табл. 3). Как показали результаты анализа проб, в точках, прилежащих к угольному терминалу, доля угольных частиц в морской воде оказалась выше, что связано с непосредственным рассеиванием угольной пыли в акватории.

Выводы

Увеличение техногенного воздействия характерно для акваторий юга Приморского края, включая залив Находка, что, безусловно, оказывает влияние на состояние экосистем данного района. Неоспоримым является факт, что активизация перевалки угля через порты, особенно неспециализированные, приводит к существенному ухудшению качества окружающей среды. Для определения качественных и количественных показателей воздействия впервые был проведен отбор проб морской воды в целях определения состава взвесей в районах деятельности угольных терминалов. Результаты пробоотбора показали, что в составе взвесей присутствуют силикаты, алюмосиликаты, органический детрит (диатомовые, таллом водорослей), уголь, моноциты и неопределяемые агрегаты. Доля угольных частиц в акватории исследуемого района составляет от 7 (вдали от терминала) до 53 % (ближайшая к терминалу точка). Это неблагоприятный прогностический признак, который в дальнейшем может оказать влияние на развитие фитопланктона, основных фильтраторов (моллюсков) и мальков рыб. Таким образом, для предотвращения необратимых изменений акватории необходимыми условиями являются разработка программы мониторинга и усиление контроля за выполнением природоохранных мероприятий предприятиями-загрязнителями в данном районе.

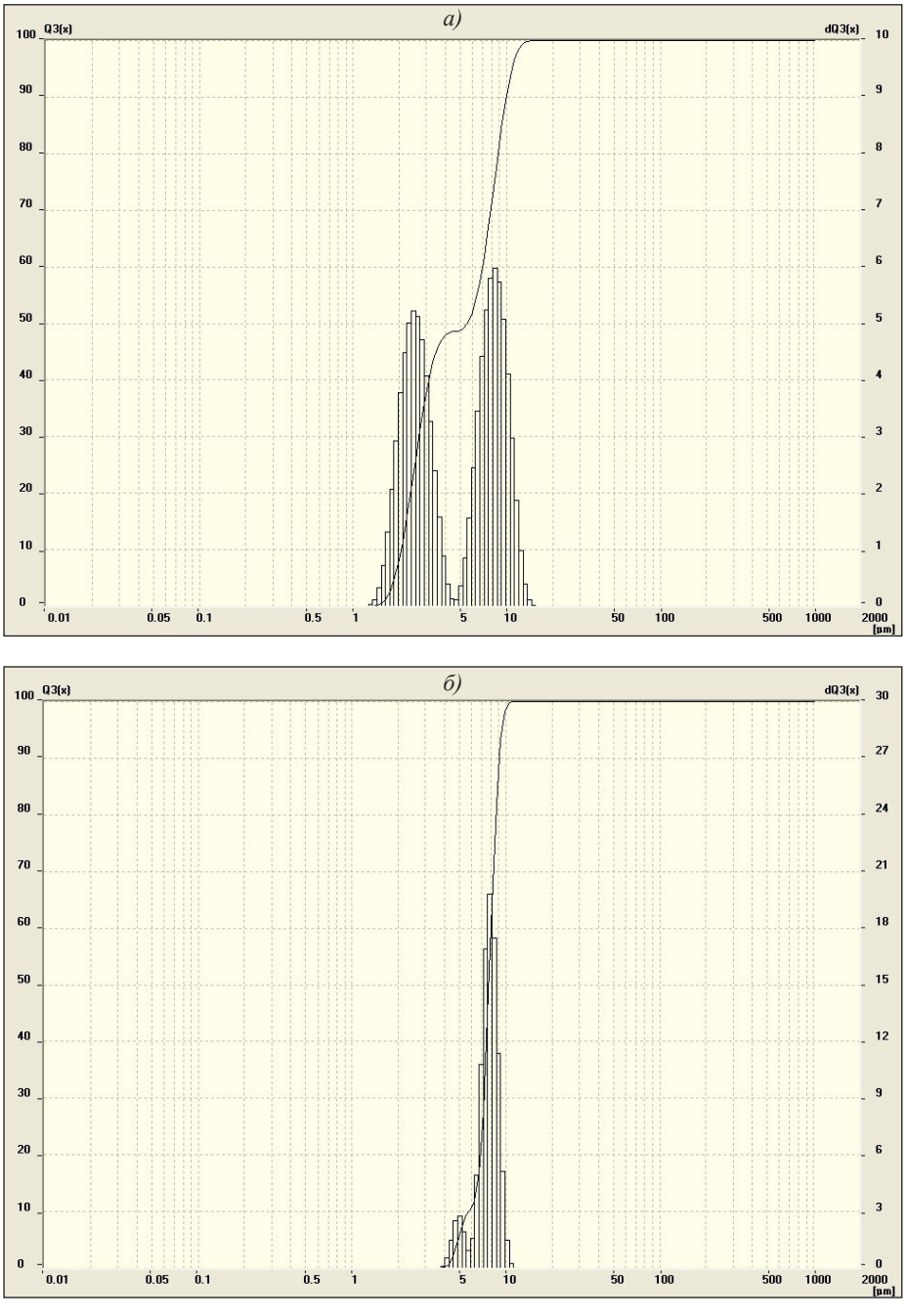

Рис. 2. Размеры частиц морских взвесей (ось абсцисс)
и их доля в % (ось ординат) из точки: *а* – 4 мая; *б* – 5 мая

Таблица 1

Морфометрические параметры частиц взвеси в различных районах

Параметр, отбор / Пункт	Средний арифметический диаметр, мкм			Мода, мкм			Медиана, мкм			Удельная площадь поверхности, см²/см³		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	604,81	52,9	11,63	1003,38	125,5	11,66	903,81	15,27	11,53	219,89	254023,3	5230,1
2	492,32	12,78	229,26	554	15,12	116,52	534,97	13,22	123,31	2807,52	21880,67	430,68
3	145,13	2,44	847,7	145,58	0,13	1003,38	142,4	0,19	963,13	434,33	576982,6	146,13
4	5,57	922,41	789,67	8,35	1003,38	1003,38	5,53	969,86	860,98	15789,3	437,6	161,98
5	7,64	88,55	11,56	7,75	86,58	11,66	7,62	85,46	11,51	8124,97	756,67	5237,31
6	33,78	896,47	20,97	34,28	718,4	11,66	34,96	709,47	14,46	4191,8	7256,7	3986,38
7	925,67	4,98	389,29	1003,38	11,66	666,99	967,96	0,35	262,83	120,49	191100,8	552,97
8	5,38	123,87	293,58	5,35	125,5	396,65	5,39	123	395,38	12465,1	492,02	1433,1
9	351,43	0,68	13,78	354,85	0,12	14,04	357,48	0,13	13,74	206,26	803187,81	4400,71
10	658,7	256,79	35,41	1003,38	427,22	11,66	802,87	392,29	15,38	113,2	1315,49	3124,24

Таблица 2

Элементный состав морской воды в различных районах (мкг/дм³)

№	Al^{27}	Cr^{52}	Fe^{56}	Ni^{60}	Cu^{63}	Zn^{66}	Cd^{111}	Ba^{137}	Pb^{207}
1	0,02 ± 0,54	0,10 ± 0,03	0,95 ± 0,28	0,68 ± 0,2	0,41 ± 0,12	2,1 ± 0,63	0,03 ± 0,01	4,32 ± 1,29	0,29 ± 0,08
2	1,21 ± 0,36	0,10 ± 0,03	1,02 ± 0,3	1,03 ± 0,31	0,45 ± 0,13	2,17 ± 0,65	0,06 ± 0,02	4,81 ± 1,44	0,13 ± 0,03
3	1,55 ± 0,46	0,12 ± 0,03	0,94 ± 0,28	1,1 ± 0,33	0,35 ± 0,1	1,71 ± 0,51	0,07 ± 0,02	4,92 ± 1,47	0,07 ± 0,02
4	1,10 ± 0,33	0,08 ± 0,02	1,01 ± 0,3	1,1 ± 0,33	0,35 ± 0,1	1,57 ± 0,47	0,06 ± 0,01	4,85 ± 1,45	0,08 ± 0,02
5	1,02 ± 0,3	0,1 ± 0,03	0,96 ± 0,28	0,8 ± 0,24	0,4 ± 0,12	1,96 ± 0,58	0,13 ± 0,04	5,14 ± 1,54	0,04 ± 0,01
6	1,17 ± 0,35	0,09 ± 0,02	1,01 ± 0,3	0,74 ± 0,22	0,41 ± 0,12	2,54 ± 0,76	0,13 ± 0,04	5,34 ± 1,6	0,12 ± 0,03
7	3 ± 0,9	0,12 ± 0,03	1,34 ± 0,4	0,84 ± 0,25	0,46 ± 0,14	2,35 ± 0,7	0,18 ± 0,05	5,52 ± 1,65	0,28 ± 0,08
8	0,93 ± 0,27	0,08 ± 0,02	0,16 ± 0,04	1,01 ± 0,30	0,57 ± 0,17	2,34 ± 0,7	0,28 ± 0,08	4,91 ± 1,47	0,11 ± 0,03
9	0,99 ± 0,29	0,11 ± 0,03	0,85 ± 0,25	0,71 ± 0,21	0,45 ± 0,13	1,77 ± 0,53	0,36 ± 0,1	5,21 ± 1,56	0,08 ± 0,02
10	1,06 ± 0,31	0,09 ± 0,02	0,81 ± 0,24	0,71 ± 0,21	0,4 ± 0,12	1,78 ± 0,53	0,3 ± 0,09	5 ± 1,5	0,12 ± 0,03

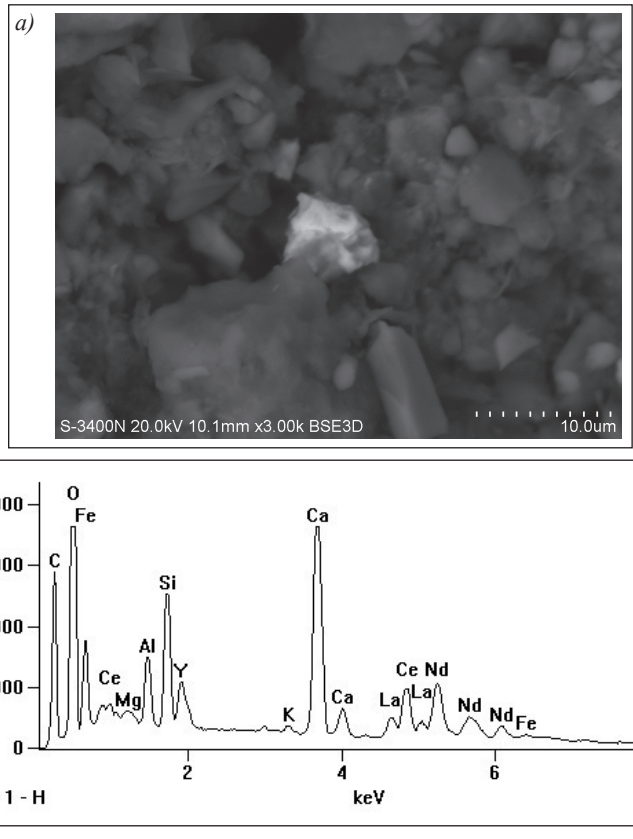

Рис. 3. Элементы морских взвесей в пробах у угольного терминала: *а* – силикат редкоземельных элементов (Y, La, Nd, Ce) среди угольных и силикатных частиц; *б* – сканирующая электронная микроскопия в режиме отраженных вторичных электронов (измерительный отрезок 10 мкм)

Таблица 3

Доля угольных частиц в разных местах отбора

Номер точки отбора проб	Встречаемость угольных частиц, шт/100
1	13±2
2	10±1
3	12±2
4	21±10
5	17±5
6	13±1
7*	**34±11**
8*	**53±8**
9	8±1
10	7±1

***** Пункты, прилегающие к угольному терминалу.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых докторов наук МД-7737.2016.5.

Литература

1. *Журавель Е.В., Маркина Ж.В., Подгурская О.В.* Оценка загрязнения поверхностных вод залива Находка методом биотестирования // Проблемы региональной экологии. 2009, № 2. – С. 117–122.
2. *Оценка* состояния вод залива Восток (залив Петра Великого, Японское море) по гидрохимическим и микробиологическим показателям / Е.В. Журавель, Н.К. Христофорова, О.А. Дроздовская, Т.Н. Токарчук // Изв. Самарского научн. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1–9. – С. 2325–2329.
3. *Федорец Ю.В.* Исследования зоопланктона бухты Врангеля (залив Находка, Японское море) // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. Естественные науки. 2015, № 3. – С. 66–74.
4. *Шулькин В.М.* Металлы в экосистемах морских мелководий. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 279 с.
5. *Ahrens M.J., Morrisey D.J.* Biological effects of unburnt coal in the marine environment // Oceanography and Marine Biology: An Annual Review, 2005, 43, 69–122.
6. *Campbell P.M., Devlin R.H.* Increased CYP1A1 and ribosomal protein L5 gene expression in a teleost: The response of juvenile chinook salmon to coal dust exposure // Aquatic Toxicology, 1997. Vol. 38, Issues 1–3. – P. 1–15.
7. *Johnson R., Bustin R.M.* Coal dust dispersal around a marine coal terminal (1977–1999), British Columbia: The fate of coal dust in the marine environment // International Journal of Coal Geology, 2006. № 68. – P. 57–69.
8. *Hillaby B.A.* The effects of coal dust on ventilation and oxygen consumption in the Dungeness crab (Cancer magister). Canadian Technical Report of fisheries and aquatic sciences № 1033.

УДК [551.46.09:504.5:665.71](261.243)«324»

***В.Б. Погребов*, Н.В. Чернова, О.А. Кийко, В.Г. Пчелинцев, Е.В. Чаадаева, Н.А. Позднякова**

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ) К РАЗЛИВАМ НЕФТИ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Агентство экологического консалтинга и природоохранного проектирования ЗАО «Экопроект»; nchernova@mail.ru

***V.B. Pogrebov*, N.V. Chernova, O.A. Kiyko, V.G. Pchelintsev, E.V. Chaadayeva, N.A. Pozdnyakova**

SENSITIVITY OF THE EASTERN GULF OF FINLAND (THE BALTIC SEA) TO THE OIL SPILLS IN THE ICE PERIOD OF YEAR

Приведены результаты исследований, выполненных в экологическом агентстве «Экопроект» (http://www.ecopro.spb.ru/) в рамках финско-российского проекта WINOIL (http://www.merikotka.fi/winoil/) в целях оценки суммарной экологической выгоды применения диспергентов при ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов в Финском заливе в зимний период. Уязвимость побережий картирована на основе данных о распределении организмов бентоса, ихтиофауны, птиц и тюленей, с использованием индекса экологической чувствительности. На этой основе построены карты интегральной уязвимости и экологических рисков воздействия нефтяных разливов для зимнего времени с учетом долговременных последствий (по результатам проекта BRISK – http://www.brisk.helcom.fi/). Анализ успеха ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов без использования и с использованием диспергентов показывает, что в зимний период (ноябрь–апрель) применение диспергентов в Финском заливе экологически оправдано (более эффективно в сравнении с механическими методами очистки и уменьшает суммарный экологический ущерб). Использование диспергентов находится в соответствии с действующими нормативными актами Российской Федерации и может быть рекомендовано при ликвидации разливов нефтепродуктов в Финском заливе в зимний период.

Ключевые слова: *экологическая чувствительность, разливы нефти, диспергенты, анализ суммарной экологической выгоды, Балтийское море, Финский залив.*

The study was carried out by the Environmental Agency ECOPROJECT (http://www.ecopro.spb.ru/) within the Finnish-Russian project WINOIL (http://www.merikotka.fi/winoil/). Environmental sensitivity (vulnerability) of the Russian part of the Gulf of Finland is assessed for the wintertime (November-April) basing on the distribution of benthos, fishes, birds and seals, using Environmental Sensitivity Index (ESI). These maps are created for both oil slick and dispersed oil in order to compare their impact on the ecosystem of the Eastern Gulf of Finland, as a part of preliminary Net Environmental Benefit Analysis (NEBA). Map of long-term average environmental damage due to accidental spills for the wintertime is created basing on the maps of the long-term average oil impact obtained in the BRISK Project (http://www.brisk.helcom.fi/). Results of the study had shown that application of dispersants in the Gulf of Finland in winter is ecologically preferable, when compared to the 'monitoring' option. From the environmental point of view, use of dispersants may be recommended as a method of the oil spill response (OSR).

Keywords: *environmental sensitivity, oil spill response (OSR), dispersants, Net Environmental Benefit Analysis (NEBA), Gulf of Finland, the Baltic Sea.*

Gulf of Finland (GoF) waters have perhaps the densest maritime traffic in Europe. Furthermore, it is a major oil transport route for the EU's energy demand due to the existing and planned oil terminals in the area: last year more than 150 million tons of oil was transported especially from Russian oil terminals, and there are estimations that the oil transport rate will be close to 200 million tons annually in 2018. Every day there are close to 20 tankers eastbound empty and westbound fully laden sailing through the GoF waters. The large numbers of tankers and other dense shipping in the area point out the need for good understanding on the risks and possible risk control measures to develop preparedness against the environmental pollution and human losses. On the other hand, the dense traffic poses the effective pollution response activities, where the cross-border co-operation between national authorities is having the uttermost importance.

In addition, GoF waters are covered by ice every year, where changing ice conditions, traffic restrictions and icebreaker-based assistance will totally have another traffic risk scenarios to be handled. If a collision or grounding in ice conditions will result an oil outflow, the effective oil combating measures are far from those used in open water conditions, thus the prevention measures to avoid accidents are more than important.

The WINOIL project (http://www.merikotka.fi/winoil/), which results are discussed in the paper, was focused on two main issues: (1) to update and develop the pollution combating contingency plan between Russia and Finland related to GoF waters, and (2) to carry out risk assessment of winter navigation with the understanding of proper risk control options. The last two winters in the Baltic have also pointed out the urgency for this project via the continuous news on dozens of ships being stuck in the ice with additional down-time costs adding up to more than hundreds of millions of Euros. In the spring 2011 alone, there were weeks when more than 60 ships were stuck in the ice waiting the icebreaker assistance to Russian ports.

The overall objective of the WINOIL project was to increase understanding of oil pollution prevention measures, improve the joint emergency cross-border procedures in oil accident, and to mitigate the risks related to ship navigation in ice conditions prevailing in the Gulf of Finland. Russian Environmental Agency ECOPROJECT was involved mainly in the studies on (1) updating the sensitivity mapping of the eastern part of the Gulf of Finland for the winter period, and (2) factors affecting on the use of dispersants in the GoF.

The task on sensitivity mapping of the eastern part of the Gulf of Finland for the winter period seems to be especially important since almost all studies and classifications defining the vulnerability of the area are based on the open water season. However, the eastern part of the GoF waters are ice covered 5 to 6 months every year, thus an analyses for the wintertime is needed:

– Arctic water fowls use the waters during their spring and autumn migration seasons; waters can be partly ice covered especially in the spring;

– Large seal populations have their haul-outs and migrating routes in the target area – seals have their reproduction areas in the fast ice zone;

– Dynamics of ice movement will decrease the successful oil recovery activities, thus any oil left into the ice can spread with moving ice to the vulnerable areas.

The task on factors affecting the use of dispersants in the GoF is important practically. Dispersants are widely used in oceanic environment due to their ability to disperse oil into the large water mass, which may decrease the oil impact in the coastline. In the case of sensitive and vulnerable areas, the use of dispersants may offer an option if mechanical recovery activities cannot be used. However, the use of dispersants for oil combating in the Baltic Sea area is not recommended by HELCOM. With reference to HELCOM Recommendation 22/2, it has been decided that, due to the sensitive ecological conditions in the Baltic Sea area, response to oil should take place by the use of mechanical means as far as possible. Response by using dispersants should be limited, sinking agents should not be used at all and absorbents only when appropriate. However, the use of dispersants is not prohibited, only recommended to be limited.

The task on factors affecting the use of dispersants in the GoF aims to assess the latest information and the best knowledge within the field of dispersants in order to come up with revised knowledge to promote the best environmental practices and best available technique within oil spill response. Here the Russian experiences and the guidelines of NEBA (Net Environmental Benefit Analyses) were used together with the sensitivity assessment made by HELCOM in the BRISK Project (http://www.brisk.helcom.fi/). The outcome is a state of the art review on the dispersants use in the Eastern Baltic Sea in relation to NEBA and sensitivity assessment [9, 10].

Methods

According to the data collected by the BRISK project, frequency of the ship-ship collisions north of 59° parallel is the highest in January–April with the highest frequency of the ship-icebreaker collisions in February–April [12]. In numbers, Gulf of Finland is expected to experience 9 % more collisions per sailed sea mile under ice conditions compared to ice-free conditions [12]. Taking the abovementioned into consideration as well as data presented below, we divided the ice period in our study into two periods: (1) beginning of winter: November–January, and (2) the height of the wintertime and its end: February–April.

Environmental sensitivity (vulnerability) is usually characterised according to the following parameters:

– presence of Protected Areas in the region;
– occurrence of Red Book species; and
– seasonal concentration of species according to their life cycle.

Many examples of how to present data on the vulnerability of marine areas can be found in publications of the International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (www.ipieca.org). The standard results of this approach are atlases of animal distribution (usually showing fishes, birds, and marine mammals). Vulnerability is usually shown on maps by colour gradations, species are designated by special signs (similar to those in our maps), and seasonality, by special codes. However, this presentation method has certain limitations for decision-makers because of the large number of maps and the necessity to prioritise many heterogeneous species or groups.

A method of integral marine and coastal biota vulnerability mapping has been elaborated and used during the last decade by specialists of the Environmental Agency ECOPROJECT (www.ecopro.spb.ru), when decision-making was required for the

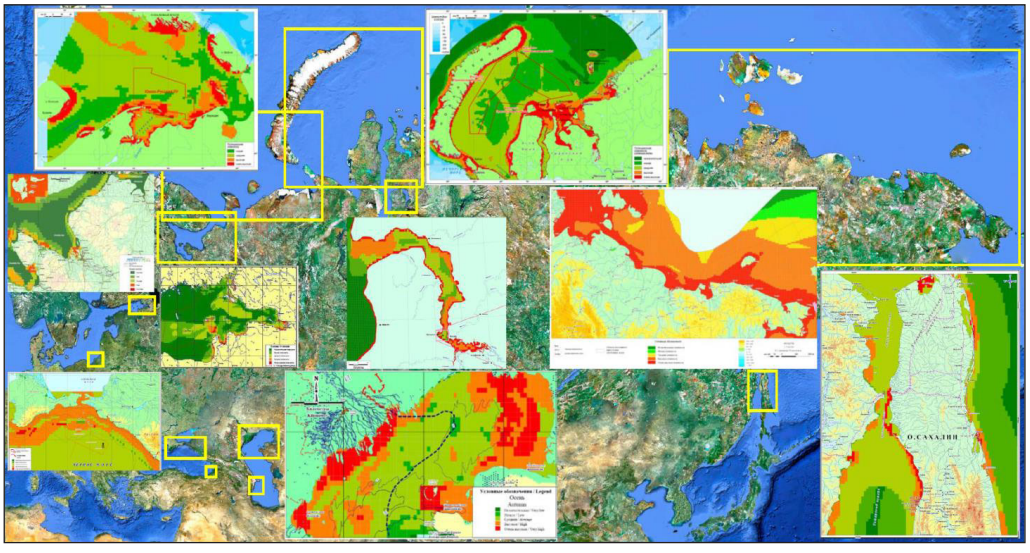

Fig. 1. ECOPROJECT's experience in the integral sensitivity mapping. Left to right, up to down: Pechora Sea, Kara Sea, White Sea, Gulf of Finland, Ob´-Tazovskaya Bay, Far-Eastern Region of Russia, north-eastern Black Sea, northern Caspian Sea, north of Sakhalin Island

development of large industrial projects in the coastal zone of Russia from the Baltic Sea to the Far East seas and from the Arctic to the Black Sea [5, 7]. At present, this method has already been tested for many sea areas of Russia (fig. 1).

Both environmentalists and professionals appreciated its results and it was used by WWF Russia as a base for 'Methodological approaches for the construction of maps, characterizing vulnerability and priority protection of water areas and coasts of Russian Federation in respect of the oil spills' [3]. This publication is not a document approved by authorities but it is the only one of its kind, where fundamental principles of integrated vulnerability mapping are discussed and procedure itself is described thoroughly, consistently and systematically.

The method proposed by ECOPROJECT is based on the following prerequisites:

– The objects under consideration are all main groups of plants and animals that inhabit the area described. This allows one to make a complex environmental characterization of the area and therefore lessens criticism from the public, expert organizations and professionals.

– Comparative vulnerability of the main elements of the biological community to the impact factors is assigned on the basis of the published data and corrected in coordination with local specialists.

– Seasonal changes in the vulnerability of separate groups of organisms are characterized on the basis of maps showing seasonal biota distribution.

– The Geographical Information Systems (GIS, in our case – MAPINFO 10.0 software package) are used in the construction of the thematic and summarizing maps.

– Integral vulnerability of the area is presented as a result of a summation of the vulnerabilities of separate groups of plants and animals, taking into account their individual vulnerability to a concrete impact, their restorative capacity, and their spatial and seasonal distribution.

The results of the integral data analysis are represented by a series of maps (usually four maps for the impact under consideration). Five colours show the integral vulnerability: from red – "very high vulnerability", through yellow – "moderate vulnerability", to green – "very low vulnerability". This way of data presentation is attained by a strictly formalized method. Advantages of such maps are their comprehensibility and the simultaneous spatiotemporal characterization of vulnerability. Decision-makers do not have to possess any special knowledge for their interpretation. To date, a series of maps showing integral vulnerability for the Russian Baltic Sea area have been produced not only for the entire Russian part of the Gulf of Finland but also for the Bay of Vyborg, Bjerkesund Strait and Luga Bay [8], as well as for the offshore areas of the Kaliningrad Region. These data are included into the results of the BRISK Project [15].

The total number of thematic maps, used for the creation of the integral maps-schemes in our previous studies [8], was about 50 and they included about 40 group objects (e.g., plankton, benthos, birds) or species objects (e.g., fishes, seals). Since they were created for four seasons, they had to be updated and detailed for the winter period in the Gulf of Finland.

In our study, data on the following groups and species were taken into account:

– Protected Areas.
– Benthic invertebrates (meiobenthos and macrobenthos).
– Lampreys (river lamprey and sea lamprey).
– Fishes (Atlantic sturgeon, Baltic herring, sprat, smelt, salmon, sea trout, vendace, whitefish, bream, roach, three-spined and nine-spined stickleback, ruff, perch).
– Birds (swans, sea and dabbling ducks, coots, divers, bluebills, gulls, sandpipers, terrestrial birds and the avifauna as a whole).
– Seals (ringed seal and grey seal).
– Shore mammals (mink).

Effects of oil spills have been studied in the form of: (1) surface oil slick, and (2) dispersed oil.

Maps of potential vulnerability of the GoF to the oil slick and dispersed oil were produced basing on the methodological approach presented above [3] with some amendments [5] (table 1).

Map of long-term average environmental damage due to accidental spills (measured in weighted grams of oil per square km) for the wintertime was created basing on the overlaying maps of (1) environmental sensitivity, and (2) maps of the long-term average oil impact based on the modelling results obtained in the BRISK Project (http://www.brisk.helcom.fi/). Twenty-one environmental maps were created in the course of the project [6] (a couple of them is presented below) and may be used by professionals in their practical work.

Some elements of a preliminary Net Environmental Benefit Analysis (NEBA) were carried out according the current regulations of the Russian Federation [13]. The use of NEBA involves weighing up the potential advantages (or benefits) of dispersant use

Table 1

Relative vulnerability of the Baltic Sea ecosystem components*
and priorities of protection of marine water areas and shorelines**
from spills of oil and oil products in respect of the oil slick
and dispersed oil used for the Gulf of Finland [5]

Ecosystem components	Vulnerability coefficient	
	Oil slick	Dispersed oil
Coast (evaluated by ESI scale)	from 1 to 10	
Benthos at depth <10 m	2	3
Benthos at depth >10 m	1	1
Fishes at depth <10 m	2	3
Fishes at depth >10 m	1	1
Birds	5	2
Seals	5	3
Protected features	Priority ***	
Protected and recreation areas	5	1

Notes: * '1' – least vulnerable, '5' – most vulnerable'; ** '1' – least priority, '5' – top priority; *** All coefficients are corrected by experts in accordance with the principle of regionalization.

compared to the potential disadvantages (or risks) of dispersant use. The main task of NEBA for the issue under consideration is to give an answer on the questions: "Is the dispersant application in considered area and for considered scenario of oil spill will be profitable for environment or not? Will be injury to environment and regional economy less if we apply dispersants or not?" [16].

Results

Marine Protected Areas, legally speaking, are absent in the Russian part of the Gulf of Finland. At the same time, out of 89 protected areas (PAs), which are present and planned in St. Petersburg and the Leningrad Region, 15 PAs are located in the coastal part, many of them also including adjacent water areas. The largest marine areas are in the regional complex reserve "The Beryozovyye Islands" (total area 55 295 hectares, including 47 020 hectares of water area) and "Kurgalsky" (total area 59 950 hectares, including 38 400 hectares of water area). The nature reserve "Ingermanlandsky", located on the islands of the Gulf of Finland, is at last (after twenty years) approved by the authorities as a State Protected Area. Its total area is 17 901 hectares, including 16 980 hectares of water area. The above PAs or at least their segments should be the first areas to be included in the list of the Baltic Sea Protected Areas (BSPAs).

Red Book Species of the region are not easy to count. First, there are many different Red Books and second, different experts do not agree as to the status of some species. Nevertheless, an interval estimate is always possible. According to estimations, there are 126 protected plant species in the Gulf of Finland (22 algae, 43 lichens, 59 vascular plants and 2 mosses). The Red Books include 7 species of invertebrates, 8 species of fish, 2 species of reptiles and 2 of amphibians, 62–80 species of birds, 2 species of sea mammals and 17 species of terrestrial mammals.

The concentration of animals according to their life cycles (feeding, reproduction, migration, moulting) is one of the basic criteria of mapping sensitive zones (e.g., zone sensitive to oil spills). Some brief information on the main components of the GoF marine ecosystem is given below.

The bacterioplankton in the eastern part of the Gulf of Finland is most abundant in the shallow zone. Its abundance and biomass decrease westwards. High abundance of saprophyte bacteria indicates considerable water pollution. According to the microbiological indices, the shallow water area is polluted and the deep-water area is moderately polluted.

The phytoplankton of the Gulf of Finland is rather poor, salinity limiting the development of both marine and freshwater species. The diversity and the biomass of the phytoplankton decrease from east to west. Its dynamics are distinctly seasonal, with several peaks of mass development: in spring, in summer, and, sometimes, in autumn. The summer peak is the most important ecologically, since it is associated with an increase of blue-green algae, causing algal blooms.

The zooplankton has a high spatiotemporal variability. Its maximum biomass is observed in summer. The latest data indicate a general increase in zooplankton production and eutrophication of the eastern part of the Gulf of Finland.

The aquatic vegetation plays an important role in the coastal ecosystems. In summer, filamentous green algae develop abundantly. A cover of brown algae is well developed on the mixed sediments of some islands. Reeds and rushes occupy a considerable part of the shallow water areas, providing spawning places for fish, nesting places for waterfowl, and shelter for both. Numerous invertebrates developing in these biotopes serve as food for fish.

The meiobenthos (benthic organisms from 0.1 to 1 mm in size) in the eastern part of the Gulf of Finland has a low taxonomic diversity. At the same time, density of meiobenthos reaches 500,000 individuals per square meter. Structural indices of meiobenthos indicate unfavourable ecological conditions in the mouth of the Bay of Vyborg and the Kopora Bay.

The macrozoobenthos (benthic organisms over 1 mm in size) in the Gulf of Finland is rather poor. Most species are limited to warm and shallow freshwater areas, the deep-water areas being inhabited by only few species. Benthic communities, consisting of a handful of species, are unique in being very simple. Abundance of macrozoobenthos varies from year to year. Two factors influence the state of macrozoobenthos: a considerable human impact in the east and the entry of salty oxygen-poor water in the west. As a result, "eutrophic" communities dominate shallow areas. In the central parts of the deep-water area, where human impact is less, the benthos communities degrade because of low oxygen content. Certain bottom areas near Gogland are lifeless. The benthic communities are unstable since they consist of a small number of species.

The fish fauna of the Gulf of Finland number about 75 species of marine, anadromous and freshwater fishes [2]. The most abundant species is Baltic herring. It has the greatest commercial value in the Gulf of Finland, making up 56.5% of the average catch for the period 2005–2013 [recalculated by data: 17]. Other commercial fish species are sprat (17.9 %), ruff (5.6 %), smelt (5.5 %), roach (3 %), perch (2.8 %), bream (2.7 %), river lamprey (0.9 %), pikeperch (0.6 %), white bream (0.6 %), vendace (0.2 %),

pike (0.2 %). Other fish (Baltic whitefish, salmon, sea trout, sichel, schneider, rudd, burbot, vimba, ide, flounder) make up 0.1 % of the catch or less. Cod is absent. Major seasonal events concerning the fish fauna of the Gulf of Finland are as follows:

– January–February: burbot spawns near the coasts and in rivers.

– April: smelt spawns in rivers and partly in the coastal areas as soon as the sea clears from ice; spawning of pike, ide, and perch.

– May: Baltic herring approaches the coast and starts spawning; salmon, sea trout, and river lamprey migrate into rivers; spawning of bream, pike, roach, perch, and ruff; spawning of smelt.

– June: Baltic herring spawns near the coasts and offshore, its young appears in plankton; sea trout migrates into rivers; spawning of bream (first half of June); spawning of ruff, pikeperch, and three-spine stickleback near the coasts; spawning of Baltic sprat offshore; spawning of Baltic river flounder.

– July: bleak spawns in brackish water bays; ruff spawns in coastal thickets; Baltic sprat spawns offshore; eggs and young of Baltic sprat appear in surface waters.

– August: "autumn" spawning of Baltic herring; migration of river lamprey into rivers; the young of European launce appear in surface coastal waters.

– September: whitefish forms pre-spawning concentrations.

– October: sea trout and river lamprey migrate into rivers; whitefish forms pre-spawning concentrations; salmon migrate into rivers.

– November: sea trout and river lamprey migrate into rivers; reproduction of four-horn sculpin.

The bird fauna of the Gulf of Finland region number over 260 species. From the point of view of sensitivity to the oil spills, the most dangerous human impact, we should consider 125 species associated with the aquatic environment and coastal biotopes. Out of this number, 62 to 80 species are included in the Red Books. The avifauna of the Gulf of Finland comprises marine birds typical of the Baltic Sea, freshwater birds, and some migratory birds using the coastal strip as stopover and feeding sites.

The association, Bird Life International, carries out a global program called "Important Bird Areas" (IBA) in order to highlight and preserve the most valuable sites, where rare and endangered species of birds occur and form mass gatherings. In the Russian part of the Gulf of Finland, there are 10 key ornithological territories of European or global significance. Some of them are located totally or partly in Protected Areas; others do not have any protection status yet, though their ornithological significance is equally important. The IBA system in the Gulf of Finland may serve as the integral description of the spatial distribution of the most important components of the sea and coastal avifauna. At the same time, certain groups of birds have their own characteristic features of spatial and temporal distribution.

Some general features of the avifauna of the Gulf of Finland are associated with the geographical position, landscape, and ecology of the region. First, the eastern border of the distribution area of many Baltic Sea birds follows the line Beryozovye Islands – Seskar Island – Luga Bay. Therefore, their numbers fluctuate considerably from year to year, especially in the case of the big cormorant, the scoter, the eider duck, the guillemot, and the black dovekey. Local populations of these birds are unstable and have to be especially protected. Secondly, the wellbeing of numerous colonies of waterfowl and

shore birds in the eastern part of the Gulf of Finland depend entirely on the quality of the aquatic environment. Finally, accumulations of migratory waterfowl birds are very important components of the Gulf of Finland's ecosystems. From 40% to 80% of the populations of the birds wintering in Western Europe fly over the Russian part of the Gulf of Finland. Their preservation has international significance as one of the measures of maintaining biodiversity. In spring, the Gulf of Finland is a natural "funnel", where the streams of migrants are drawn from the south-west. They reach maximum concentrations in the Neva Bay and the Bay of Vyborg. During seasonal migrations, thousands of swans, geese, ducks, sandpipers, gulls, and terns concentrate along the southern coast of the Gulf of Finland. Large gatherings of migratory sea ducks are found in the Gulf of Finland far from the coast too.

Marine mammals in the Russian part of the Gulf of Finland are represented by the Baltic subspecies of ringed seal (*Phoca hispida botnica*) and grey seal (*Halichoerus grypus*). Both species are included in the Red Books. In the beginning of the 20th century, the total number of seals in the Baltic Sea was about 200 thousand. In the middle of the century, a catastrophic decrease began. It was caused not only by hunting but also by the use of DDT in agriculture. At present, there are less than 100 ringed seals in the Russian part of the Gulf of Finland [18, 19]. The numbers of grey seals are increasing but do not exceed 500–600 individuals [20, 21]. Grey seals are rare in the Russian sector of the Gulf of Finland in the ice period; sometimes they are brought here by the drifting ices.

The ringed seal occurs in the Gulf of Finland all year round, although seasonal changes in habitats take place too. When the sea surface is free from ice, the seals stay in the southern part of the Gulf of Finland but not further eastwards than Seskar Island, although still in 1977 fishermen and hunters came across seals near Chyornaya Lakhta. The largest haul-outs of the ringed seal are near the islands Vigrund and Khitamatola. In May–June and in September–November, the ringed seal forms haul-outs of several dozens of individuals near Remisaar Island and on the Kiskolsky Reef. Small groups of 10–15 seals are common on the islands Maly Tyuters and Maly, and single animals climb the stones along the coast of Kurgalsky Peninsula and the islands Bolshoy Tyuters, Moshchny and sometimes Seskar Island. The ringed seals cub on ice to the south and southeast of the Beryozovye Islands. Holes with cubs were found at the coast of the Kurgalsky Peninsula. Thus, the seals migrate to the northern coast of the Gulf of Finland for cubing and moulting, and move to the southern coast in summer. In the middle of summer, they migrate from the coast to the deep areas.

Recent research has shown that the population of ringed seals in the Gulf of Finland is local and rather isolated [22]. In 1991–1992 mass mortality of ringed seals was registered: more than 150 dead bodies of mostly adult seals were found along the coasts and on the islands of the Gulf of Finland. The present decrease in the number of seals is associated chiefly with warming of climate and reduction of the ice cover in eastern Gulf of Finland [23].

In winter, the grey seal can be found in the Russian part of the Gulf of Finland, being sometimes brought with the drifting ice from the west. In summer, the grey seals can be seen at the southern coast of the Gulf of Finland. In the north, only single individuals are found in the region of the Khalikarty reefs. In the southern part of the Gulf of Finland, the breeding grounds of the grey seal can be found on the Maly Tyuters Island,

on the reefs near the Vigrund Island and in the Khitamatola Island, which is a part of the Kurgalsky Reef.

Sensitivity of coasts in the course of work was mapped using Environmental Sensitivity Index (ESI) [14]. The ESI, ranging from 1, low sensitivity, to 10, very high sensitivity, integrates the following:

– shoreline type (grain size, slope) which determines the capacity of oil penetration and/or burial on the shore, and movement;

– exposure to wave (and tidal energy) which determines the natural persistence time of oil on the shoreline; and

– general biological productivity and sensitivity.

The 10 levels of the Environmental Sensitivity Index are colour coded from cool colours to warm colours indicating increased sensitivity. Each colour corresponds to a particular type of coast allowing identification of the type and relative sensitivity at a glance [9, 10].

Application of the 'Methodological approaches for mapping of ecologically vulnerable zones…' [3] to the data from the Russian part of the Gulf of Finland had shown that potential vulnerability of the Russian part of the GoF to the oil slick is 3–4 times higher as compared to its vulnerability to the dispersed oil (this part of work is considered as a part of a preliminary Net Environmental Benefit Analysis – NEBA). However, it became clear also that the ecosystem of the Gulf of Finland reacts to possible negative impacts mostly in a non-specific way. This is expressed in the high similarity of the seasonal maps of integral vulnerability to the studied types of effects. Such kind of reaction is similar to the non-specific stress reaction of a single organism, when different stimuli can cause similar symptoms (e.g., high temperature, weakness, fever, etc.). The differences in the spatiotemporal structure of the reaction of the Gulf of Finland's ecosystem to the effects studied are so small during the year that they can be considered for all types of effects at once.

The analysis of the spatial distribution of the integral vulnerability (fig. 2) has shown that the following regions of the Gulf of Finland are the most vulnerable to the expected or possible impacts:

– the coastal shallow water areas (in different seasons they are limited to depths of 30 to 50 m);

– the areas of the Gulf of Finland adjacent to the archipelagos and separate islands, the most sensitive being the coast of the islands of the Kurgalsky Reef and the islands in the open part of the Gulf of Finland;

– the tops of the secondary bays (first of all, the Luga Bay, Kopora Bay and, to a lesser extent, Narva Bay and the Bay of Vyborg).

Ranking of the seasons in decreasing order of ecological sensitivity is as follows: summer > spring ≥ autumn > winter. Interestingly, when creating the maps showing integral ecological sensitivity, we found spring is the most sensitive season in the Russian part of the Gulf of Finland for only three groups (fish, birds and seals). This is explained by the diminished evaluation of the role of such highly sensitive groups of organisms as algae, higher aquatic plants and zooplankton, which develop, or have a peak of development, in summer. Meanwhile, all these organisms are important not only in themselves but also as an important part of the ecosystem of the water basin. For example, algae and higher aquatic plants are substrates for fish spawning and a nesting biotope for

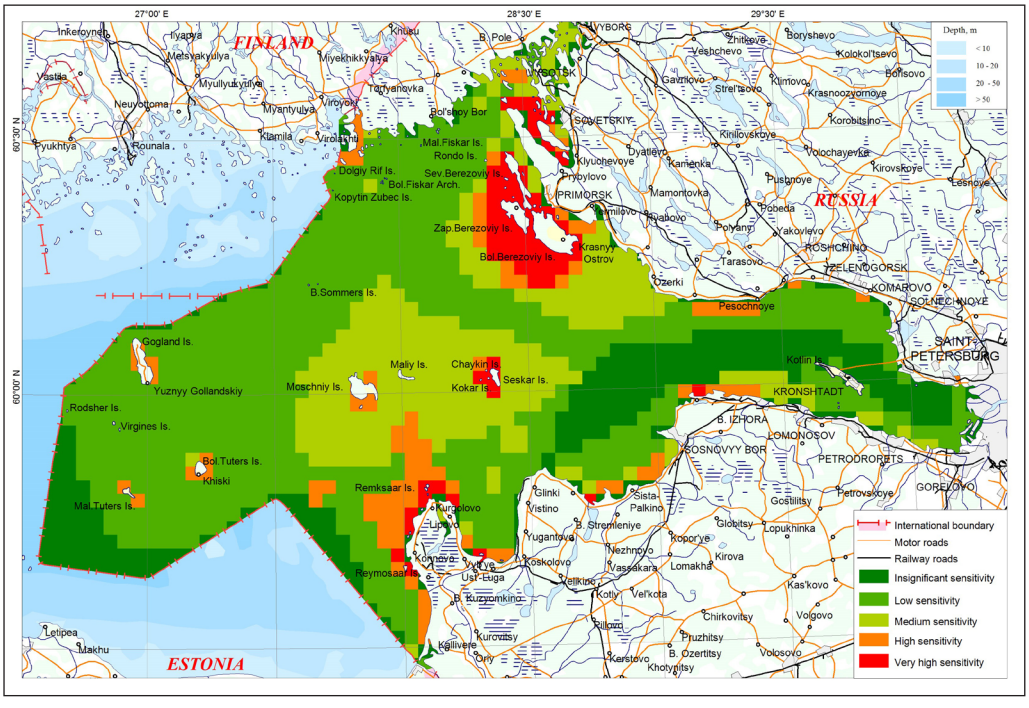

Fig. 2. Integral vulnerability of the Russian part of the Gulf of Finland to the oil sick in winter (November–April)

birds. Zooplankton forms the forage basis of all commercial species of fish. This example shows that in order to obtain an *integral* assessment, we should consider *all* main components of the ecosystem of the water body, and not only a small sample of them.

Assessment of long-term average environmental damage due to accidental spills measured for the ice period according to the methodology used in the BRISK Project [1, 11] (fig. 3) had shown that risk of environmental damage is higher in the vicinity of Beryozoviye Islands, Kurgalsky Reef and islands of the central part of the GoF. Map of long-term average environmental damage resembles the vulnerability map only to some extent but does not reproduce it completely. Practical value of mapping the long-term average environmental damage as compared to the mapping of environmental vulnerability should be assessed by the OSR specialists. According to our opinion, assessment of the approach practical value needs more cases for study and analysis. In any case, one may conclude that application of dispersants in the GoF is ecologically justified and, from the environmental point of view, may be recommended as a method of the oil spill response in compliance with the current regulations of the Russian Federation [13].

Discussion

Past experience at several major oil spill incidents has shown that any negative effects on marine organisms caused by the elevated dispersed oil concentrations due

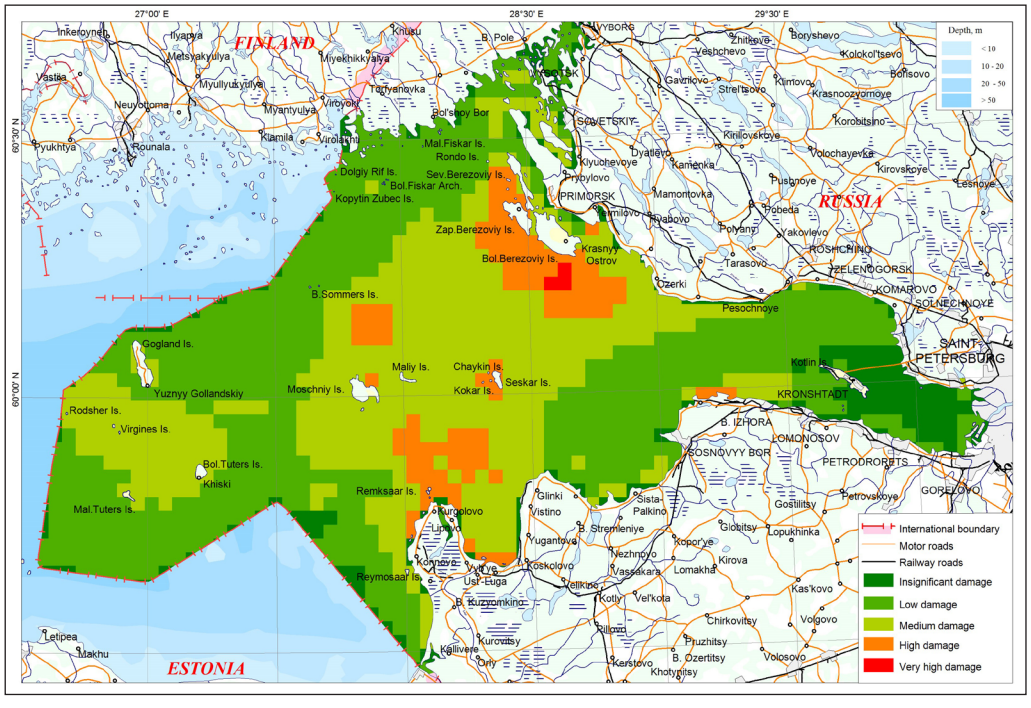

Fig. 3. Distribution of long-term average environmental damage due to accidental spills (measured in weighted grams of oil per square km) from all accident size classes in winter (November–April)

to dispersant use were often localized and of short duration [4]. Ecological studies and monitoring following major oil spills have repeatedly shown that the populations and communities of water column organisms (the algae and zooplankton, larger invertebrates and fish) can recover much more quickly from brief exposure to dispersed oil in the water than the populations and communities of birds, mammals, sea-grasses, or mangroves that may be exposed to oil that comes ashore. It can take years to decades for some of these shoreline communities to recover from oiling, whereas many water column communities can recover in weeks to months. The marine environment is, in general, more resilient that the coastal environment and natural recovery will take far less time.

If a particularly oil-sensitive coastal habitat is threatened by spilled oil and the sea conditions make other oil spill response options unfeasible, dispersant use might be justified in even in shallow water [4]. The advantage, or benefit, of using dispersant use to minimise shoreline oiling and therefore prevent a lot of persistent and long-lasting damage could be very high compared to the significant, albeit short-term, damage that might be caused to the marine organisms.

Our own study had shown that potential biota vulnerability of the GoF to the oil slick is at least three times higher as compared to the potential biota vulnerability to the dispersed oil. Therefore, summarizing the work results, one may conclude that application of dispersants in the GoF is ecologically justified and, from the environmental point of view, may be recommended as a method of the oil spill response.

Acknowledgements

The study was carried out as a part of a Project entitled 'WINOIL: Winter navigation risks and oil contingency plan'. The grant No. 2011-086-SE680 was financed from the European Neighbourhood and Partnership Instrument in the framework of the South-East Finland-Russia ENPI CBC programme 2007–2013. More than a dozen of specialists had made their input into the project results. We are especially thankful to Doctor of Geology Svyatoslav M. Usenkov (coastline, seabed sediments), Nick V. Dmitriyev (GIS cartography) and Anton Yu. Krummet (translation).

References

1. *Baltic Sea* regional programme 2007–2012. #14 BRISK sub-regional risk of spill of oil and hazardous substances in the Baltic Sea. Summary report. – Denmark: COWI, 2011. 20 p.
2. *Chernova N.V*. 2014. Fish fauna of the Gulf of Finland, short review // Proc. Russian State Hydrometeorol. Univ**.** № 35. P. 55–70. (In Russian).
3. *Methodological* approaches for mapping of ecologically vulnerable zones and regions of water areas and shorelines with priority protection against spills of oil and oil products in the Russian Federation / Blinovskaya Ya.Yu., Gavrilo M.V., Dmitriyev N.V., Pogrebov V.B., Puzachenko A.Yu., Usenkov S.M., Knizhnikov A. Yu., Pukhova M.A., Shilin M.B., Semanov G.N. Vladivostok – Moscow – Murmansk – Saint-Petersburg – Murmansk: World Wild Life Fund for Nature (WWF), 2012. – 60 p. Translated in 2014. On-line: http://www.wwf.ru/resources/publ/book/eng/888.
4. *Oil* spill dispersants: Developments in regulations and industry perspectives. A background discussion paper for a dispersant session at Inter Spill 2012. – London: Interspill, 2012. 18 p. On-line: http://www.interspill.org/previous-events/2012/.
5. *Pogrebov V.B*. 2010a. Complex assessment of the environmental vulnerability of coastal biological resources to the human impact // Principal concepts of the present day coast use. V. 2. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University. – P. 43–85. (In Russian).
6. *Pogrebov V.B*. 2010b. Net Environmental Benefit Analysis // Principal concepts of the present day coast use. V. 2. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University. P. 86–122. (In Russian).
7. *Pogrebov V.B., Puzachenko A.Yu*. 2003. Environmental vulnerability of Barents, White, Baltic, Black and Caspian seas to oil extraction and transportation: comparative analysis // International Conference and Exhibition for Oil and Gas Resources Development of the Russian Arctic and CIS Continental Shelf "RAO / CIS Offshore". St. Petersburg. P. 389–393.
8. *Pogrebov V.B., Sagitov R.A., Dmitriyev N.V*. 2006. Nature Conservation Atlas of the Russian Part of the Gulf of Finland. St. Petersburg: Tuscarora. 60 p.
9. *Pogrebov V., Usenkov S., Kiyko O., Chernova N., Chaadayeva E*. 2014a. Environmental vulnerability of the Eastern Gulf of Finland during the wintertime and preliminary NEBA of the use of dispersants: Report. Agency of Ecological Consulting & Nature Protection Design ECOPROJECT. 52 p. – On-line: http://www.merikotka.fi/projects/current-projects/winoil/publications/.
10. *Pogrebov V., Usenkov S., Kiyko O., Chernova N., Chaadayeva E*. 2014b. Environmental vulnerability of the Eastern Gulf of Finland during the wintertime and preliminary NEBA of the use of dispersants: Atlas. Agency of Ecological Consulting & Nature Protection Design ECOPROJECT. 23 p. – On-line: http://www.merikotka.fi/projects/current-projects/winoil/publications/.
11. *Project* on sub-regional risk of spill of oil and hazardous substances in the Baltic Sea (BRISK). Model report: Part 1. Ship traffic. Denmark: COWI, 2012a. 36 p.
12. *Project* on sub-regional risk of spill of oil and hazardous substances in the Baltic Sea (BRISK) Model report: Part 4. Frequency and quantity of spill of oil and hazardous substances. Denmark: COWI, 2012b. 66 p.
13. *Regulations* on Oil Spill Dispersants Application STO 318.4.02-2005. St. Petersburg: Russian Federation Ministry of Transport, 2005. 29 p. (In Russian).
14. *Sensitivity* mapping for oil spill response. London: IPIECA/IMO/OGP, 2012. 33 p.

15. *Sub-regional* risk of oil and hazardous substances in the Baltic Sea (BRISK). Environmental Vulnerability. Denmark: COWI, 2012 c. 79 p.
16. *Semanov G.N*. 2010. Net Environmental Benefit Analysis (NEBA) and oil spill dispersants application. Presentation at HELCOM. – On-line: http://meeting.helcom.fi/c/document_library/get_file?p_l_id=83433&folderId=1000480&name=DLFE-41115.pdf.
17. *Shurukhin A.S., Lukin A.A., Pedchenko A.P., Titov S.F.* 2016. Modern condition of fishery and effectiveness using of fish supply in the Finnish Bay of the Baltic Sea // Trudy VNIRO. V. 160. P. 60–69. (In Russian).
18. *Verevkin M.V*. 2012. Present status of seals in the Gulf of Finland of the Baltic Sea // Marine Mammals of the Holarctic. Collection of Scientific Papers after the Seventh International Conference. Suzdal, September 24–28. Preprint. P. 143–146. (In Russian).
19. *Verevkin M.V., Vysotsky V.G., Sagitov R.A.* 2012. Aerial survey of the Baltik ringed seal (*Pusa hispida botnika*) in the Russian sector of the Gulf of Finland // Vestnik SPbU. Ser. 3 (1). P. 38–47. (In Russian).
20. *Harding K.C., Härkönen T., Helander B., Karlsson O.* 2007. Status of Baltic grey seals: Population assessment and extinction risk // NAMMCO Sci. Publ. V. 6. P. 33–56.
21. *Verevkin M.V., Sagitov R.A.* 2007. Marine mammals // The natural environment and biodiversity of the archipelago Birch Islands (Gulf of Finland) / Eds. B.A. Volkov, U.A. Glazkov, G.F. Isachenko, V.N. Khramzov. SPb. P. 328–330. (In Russian).
22. *Harkonen T., Jüssi M., Jüssi I., Verevkin M., Dmitrieva L. et al.* 2008. Seasonal activity budget of adult Baltic ringed seals // PLoS ONE 3 (4): e2006.doi:10.1371/journal.pone.0002006.
23. *Verevkin M.V., Vysotsky V.G., Dmitrieva L.N., Sagitov R.A.* The distribution of the gray seal and ringed seal in the Gulf of Finland during the warm winters of 2007–2008 // Marine Mammals of the Holarctic. Collection of Sci. Papers after the 5th Int. Conf. Odessa, October 14–18, 2008. Odessa, Ukrain. P. 575–578.

УДК [502.5:001.891](26)

М.А. Холмянский*, Е.М. Снопова*, М.В. Владимиров**, О.Ю. Заносов***

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ МОРСКИХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

* ООО НП «ЦИТ», holm936@rambler.ru; ** Администрация Президента Российской Федерации; *** Управление безопасности людей на водных объектах МЧС РФ

M.A. Kholmyanskii, E.M. Snopova, M.V. Vladimirov, O.Y. Zanosov

CURRENT STATUS AND FORECAST OF DEVELOPMENT OF MARINE GEOECOLOGICAL RESEARCHES

В статье описывается современное состояние морских геоэкологических исследований. Выделяются основные направления этих исследований. Анализируется дальнейшее развитие методов изучения геоэкологического состояния морских акваторий.

Ключевые слова: *море, экология, прогноз, подводные объекты, методика, исследования.*

The modern state of marine geoecological investigations is describe. The fundamental directions of this investigations are allocate. The further development of method of study of sea aquatory geoecological state is analyze.

Keywords: *sea, ecology, prognosis, underwater objects, methodic, investigations.*

Введение

В отличие от других направлений, входящих в круг проблем, объединенных общим названием «наука о Земле», морские геоэкологические исследования развивались поступательно, без существенной конфронтации между отдельными школами и группами специалистов (чего не скажешь, например, о развитии тектонических концепций или способов интерпретации материалов ряда геофизических методов). Очень существенным элементом этого поступательного развития явилось отсутствие резкого диссонанса между уровнем теоретического обоснования, методики и технологии работ и их аппаратурным обеспечением [1, 5, 7, 9, 17].

Определенные разногласия существуют в терминологической сфере, но они не влияют на теорию и практику морских геоэкологических работ [11–13].

В истории морских геоэкологических исследований можно выделить несколько периодов, характеризующихся как разными спектрами решаемых задач, так и способами их решения. В числе этих периодов условно можно выделить следующие:

1 – Общая оценка фонового состояния акваторий, разработка методов определения таких оценок на материале пробоотбора донных осадков и морской воды. Создание первых концепций геоэкологичеких работ на море.

2 – Разработка методики, аппаратуры и оборудования для комплексных геоэкологических исследований. Создание основ геоэкологического картирования в рамках морской геологической съемки.

3 – Усовершенствование аппаратурно-методических комплексов и расширение спектра решаемых задач на трансрегиональном, региональном, площадном (локальном) и пообъектном уровнях.

4 – Разработка основ мониторинга разного уровня и целевой направленности: федерального, регионального, специализированного – производственного, физико-химической, инженерно-геологической направленности и др.

5 – Современные многофункциональные геоэкологические исследования на море с использованием многопараметровых аппаратурно-методических систем. Проведение трансрегиональных и региональных морских экологических патрулей. Создание и развитие нового направления в науках о Земле – подводной объектологии.

6 – Развитие современных основ геоэкологического картирования.

7 – Создание современного многофункционального аппаратурно-методического геоэкологического комплекса на базе теоретического обоснования применяемых модификаций наблюдений и измерений и использования достижений в развитии системотехники.

8 – Разработка систем геоэкологического прогноза для акваторий, обоснование дальнейшего развития теории и практики геоэкологических исследований и их нормативного обеспечения.

Геоэкологические исследования на море: состояние, направления, методика, развитие

Свое начало морские геоэкологические работы берут от изучения морских геохимических ландшафтов. Именно методика и интерпретация данных пробоотбора на морских акваториях, построения таблиц и ландшафтных схем позволили увязать геохимические (физико-химические) данные с геоморфологией и литодинамикой и выделить характерные ландшафтные комплексы. Использовав эту методику для анализа распределения различных типов загрязнителей, содержащихся в донных отложениях и морской воде, удается дать общую геоэкологическую оценку изучаемых районов морских акваторий [6, 7].

Начиная с середины 1990-х годов прошлого века отбор проб на геоэкологический анализ стал дополняться измерениями содержания поллютантов с помощью ионо-селективных электродов и других забортных датчиков, используемых в режиме зондирования с борта экспедиционных судов или профилирования на ходу судна, и спектр решаемых геоэкологических проблем на море стал неуклонно расширяться. К настоящему времени можно выделить основные направления морских геоэкологических исследований, выполняемых отечественными и зарубежными организациями в рамках как производственных, так и научных работ:

– общая оценка геоэкологического состояния акваторий;
– фациальный геоэкологический анализ;
– мониторинг разного уровня и направленности;

– развитие теории, методологии и технологии геоэкологических морских исследований;

– выполнение морских экологических патрульных исследований;

– создание нормативных документов;

– подводная объектология (поиск и геоэкологическое обследование подводных потенциально опасных объектов);

– геоэкологическое сопровождение освоения морских месторождений;

– ведение наблюдений, сбор качественных и количественных показателей состояния недр прибрежно-шельфовых зон российских морей;

– картирование;

– прогнозирование;

– усовершенствование аппаратурно-методического обеспечения геоэкологических работ на море.

Общая оценка геоэкологического состояния морских акваторий. Примером общей оценки геоэкологического состояния акваторий могут служить ведение наблюдений, сбор качественных и количественных показателей состояния окружающей среды (недр).

Такая оценка проводится в рамках государственного заказа по линии Министерства природных ресурсов РФ и выполняется соответствующими подразделениями ведущих геологических организаций нашей страны: ВНИИОкеангеология, ВСЕГЕИ, Гидроспецгеология.

Другим примером общей оценки являются исследования в рамках морских международных геоэкологических патрулей, выполняемые на акватории северо-западных морей Европы силами специалистов России, Дании, Польши, Швеции, Финляндии и Норвегии. Исследования ежегодно проводятся на выбранных морских полигонах и профилях, расположенных в Балтийском, Северном и арктических морях, проливах Скагеррак и Каттегат [3, 8].

К решению задач в рамках такой оценки привлекается широкий комплекс методов, объединенных в аппаратурно-методическую систему: анализ проб донных осадков и морской воды на основные загрязнители; геофизические наблюдения, включающие в себя сейсмоакустические, электроразведочные, радиоактивные, визуальные наблюдения за состоянием морского дна с использованием самой современной фото-телевизионной техники; долговременные измерения параметров окружающей среды с помощью многофункциональных буйковых станций [14].

После интерпретации получаемых материалов составляются отчетные документы, передаваемые для принятия управляющих решений в региональные и федеральные органы. В число этих документов входят отчеты, атласы карт, бюллетени, частично издаваемые в открытой печати.

Техногенные фации морских акваторий. Углубленное изучение процессов техногенеза во времени и в пространстве во всем многообразии взаимоотношения человека и природы, биогенной и абиогенной составляющих экосистем как на суше, так и на море потребовало создания единой основополагающей базы. В качестве такой базы мы выбрали фациальную основу и дали определение техногенной фации: «Техногенная фация – обстановка мобилизации переноса и накопления техногенных веществ любых генетических типов».

Во всем многообразии признаков, определяющих типы техногенных фаций, по нашему мнению, на первое место следует поставить процессы мобилизации, переноса и накопления материала. Исходя из генетических причин нарушения экосистемы, мы можем при определении типа техногенных фаций использовать самые разнообразные характеристики морской среды, так или иначе связанные с антропогенным воздействием на нее.

В число таких характеристик входят:

– инженерно-геологические – скорость погружения объекта в донные отложения; прочность оснований сооружений, расположенных на морском дне;
– гидрофизические;
– гидрохимические;
– потенциальные поля;
– геокриологические.

Для каждого типа характеристик можно выделить группы фаций: а) по мобилизационным провинциям; б) по положению на шельфе; в) по глубине моря; г) по составу донных отложений. Список может быть продолжен.

Для морских акваторий целесообразно по условиям, определяющим источники поступления техногенного материала, выделить: первичные или вторичные, расположенные на суше и существующие или образовавшиеся на море. В первом случае мы имеем дело с различными видами наземных производств, хозяйственной и бытовой деятельностью поселков, городов, сельским хозяйством, лесной промышленностью, поставляющими на шельф широкий спектр поллютантов в разных их соотношениях. Во втором случае поступление поллютантов связано с разработкой морских месторождений твердых полезных ископаемых, с переотложением и вторичным переносом накопленных на дне загрязняющих веществ, как поступивших с суши, так и обязанных своим возникновением различным потенциально опасным объектам, расположенным на дне.

Целесообразно классифицировать техногенные фации исходя из доминирующей их характеристики, дополняемой остальными. Таким образом, мы приходим к соответствующей фациальной формуле, позволяющей как достаточно детально представить современное состояние той или иной части акватории шельфа, так и моделировать его изменения в близком или относительно далеком будущем.

В основе любого фациального подразделения акваторий мы используем суммарную формулу, составленную из вышеприведенных фациальных характеристик. Классификация техногенных фаций делается на основании выделения доминирующего фациального признака и последующего введения в формулу, остальные ранжированы авторами произвольно. Формула может быть представлена как функция от следующих параметров: Эп2а, Уз2, Стмм, Ствбн, Ствмх, Тфмо, – где Эп2а – умеренный экодинамический процесс аккумуляции техногенного материала; Уз2 – опасные техногенные загрязнители – тяжелые металлы (в группу входят Be, As, Zn, Mn, Pb, Mo, Sn, Cu); Стмм – взмучивание донных осадков при разработке строительных материалов; Ствбн – высокое нарушение биогенного состояния экосистемы; Ствмх – высокое нарушение механических характеристик донных отложений; Тфмо – техногенная фация – формируется за счет первичных и вторичных процессов поступления техногенного материала.

На основании таких фациальных формул нами составлен ряд фациальных карт для шельфа Балтийского и Белого морей.

Картирование. Важнейшим элементом современных представлений, подходов, предложений и т. д. является принципиально новая позиция в построении геоэкологических карт.

Отметим, что ввиду отсутствия на сегодняшний день унифицированных инструктивных документов, утвержденных на федеральном или хотя бы на региональном уровне, при построении морских геоэкологических карт доминируют авторские подходы [2]. Один из них основан на инструктивных требованиях, нормируемых соответствующими документами, регламентирующими геологическую съемку, где среди обязательных карт, завершающих съемку, фигурирует и геоэкологическая. Ее легенда и содержание не соответствуют требованиям непосредственно экологического характера.

Другой подход предлагает под рефреном «геоэкологические» ряд карт геологического толка (геохимическая, современных осадков и пр.) и более или менее связанную с ними геоэкологическую, экогеологическую и т. д. карту. Примером этого подхода являются геоэкологические атласы, созданные и частично опубликованные в последние годы: Атлас геоэкологических карт Баренцева моря; Геоэкологический атлас восточной части Финского залива; Геоэкологический атлас участков прибрежно-шельфовой зоны Белого, Баренцева, Карского морей и др.

Отдельными авторами создаются специализированные геоэкологические карты моно- или полиэлементного загрязнения, опасных геоэкологических процессов (обычно подразделенных на экзо- и эндогенные); экогеодинамические и т. п. Наконец, в ряде случаев делается попытка оценить устойчивость шельфовых экосистем к техногенным воздействиям или ранжировать геоэкологическую обстановку в системе балльности (правда попытки такого ранжирования преимущественно относятся к суше).

Все эти варианты картографирования, на наш взгляд, не решают основной функциональной задачи – многофункционального отражения геоэкологической информации в виде соответствующей модели, каковой и является геоэкологическая или экогеологическая карта. Основываясь на вышеописанном фациальном подходе к «экогеологической проблеме» и полученном за последнее десятилетие фактическом материале, позволяющем группировать необходимые характеристики, мы обосновали построение ряда карт техногенных фаций. Это карты многослойные, построенные с использованием ГИС. Только такой вариант построения позволяет решить «затянувшуюся» проблему экогеологического картирования на шельфе. Доложенный на международных совещаниях предлагаемый подход получил одобрение у научного сообщества, что дает нам дополнительную мотивацию к созданию атласа техногенных фаций северо-западных морей Европы.

В настоящее время единственными документами, принятыми на федеральном уровне, регламентирующими содержание геоэкологических морских карт, являются инструкции по проведению морской геологической съемки разного масштаба. Необходимость создания инструкции по составлению морских геоэкологических карт не вызывает никаких сомнений.

Геоэкологическое сопровождение освоения месторождений арктического шельфа. Выбор оптимального режима недропользования возможен на базе исследований, включающих в себя:

– анализ возможностей хозяйственной деятельности на шельфе, регламентированных соответствующими нормативными документами;

– детальное изучение всех негативных последствий освоения месторождений;

– оценку финансово-экономических путей обеспечения рационального недропользования на основе экологического менеджмента;

– проведение геоэкологического (экогеологического и технологического) мониторинга;

– проведение экологической экспертизы проектов, паспортизации лицензионных участков;

– выбор оптимальных технологических режимов;

– систему управляющих решений, основанных на принципах оптимального недропользования.

К основным видам геоэкологического воздействия морского добычного комплекса на окружающую среду относятся: физическое, химическое, биологическое, механическое. Суммарное воздействие носит комплексный характер и проявляется в форме физических, химических и биологических нарушений в водной толще морской среды, на дне и частично в атмосфере.

Основные принципы при разработке системы экологического сопровождения работ, связанных с освоением месторождений углеводородных и твердых полезных ископаемых [5]:

а) *приоритетность* – производство работ на шельфе не будет осуществляться за счет нарушения экологического равновесия в природной среде; меры по предотвращению экологических последствий превалируют над мерами по их ликвидации;

б) *обоснованность риска* – принятие решений по экологической деятельности основывается на зарубежном и отечественном опыте освоения месторождений, на проведении моделирования (прогнозных оценок) возможных экологических последствий добычной деятельности, базирующихся на результатах мониторинга.

Реализация этих двух принципов позволяет в конечном итоге принимать обоснованные управляющие решения по экологически сбалансированному развитию добычных работ.

В основе п р а в о в о г о обеспечения экологической безопасности добычных работ должны лежать заключения государственной экспертизы на проекты этих работ на море, утвержденные приказами Государственного комитета по охране окружающей среды.

Основой структуры системы геоэкологического сопровождения освоения месторождений в морях является специализированный геоэкологический мониторинг, который выполняется на всех этапах проведения работ на месторождениях. На прогнозной и поисковой стадии освоения проводится общий мониторинг регионально-локального уровня. Полигоны для его проведения на акватории морей выбираются исходя из геоморфологической, литологофациальной, литодинамической и геокриологической обстановки.

В соответствии с действующим природоохранным законодательством недропользователи обязаны создавать систему регулярных наблюдений за состоянием окружающей природной среды (воды, донные осадки, геокриозон, атмосферный воздух). На предварительном этапе освоения месторождений создается *регламент экологического мониторинга.*

В качестве основных задач локального мониторинга для лицензионных участков в рамках такого регламента следует выделить:

• контроль состояния окружающей природной среды шельфа по физическим, химическим и биологическим параметрам в целях определения уровня загрязнения, выявления основных источников загрязнения и регламентации основных природоохранных мероприятий, планируемых на разных стадиях освоения месторождений;

• обеспечение контролирующих и природоохранных органов систематическими данными об уровне загрязнения окружающей среды, прогнозом их изменения и, на стадии промышленного освоения, экстренной информацией – в случае резких повышений уровня загрязнения вышеуказанных сред.

Экологический мониторинг на лицензионных участках. Для выявления возможных изменений в развитии экосистем в районах поисково-оценочных работ на лицензионных участках проводится регулярный долгосрочный комплексный экологический мониторинг на основе разработанной концепции и специализированной информационно-измерительной системы.

Достигаемые при этом цели мониторинга состоят:

– в выявлении потенциальной опасности деградации окружающей среды;

– определении степени вреда, причиняемого биоресурсам бассейна;

– определении уровня деградации всей экосистемы, включая оценку ее загрязнения;

– оценке эффективности мер, применяемых для уменьшения антропогенной нагрузки.

Программа мониторинга (режим, сетка станций, измеряемые параметры) стандартизирована в соответствии с российской и международной практикой подобных исследований и согласовывается со специально уполномоченными государственными органами по охране окружающей среды.

Теория, методология и технология геоэкологических морских исследований. Основные теоретические разработки в области морских геоэкологических исследований связаны с обоснованием необходимой (для получения обоснованных заключений о состоянии окружающей среды) точности и разрешающей способности применяемых геофизических, геологических и аналитических модификаций наблюдений, с геоэкологическим прогнозом и обоснованием создаваемых нормативных документов.

Выбор оптимальных технологических способов морских геоэкологических исследований основан на:

– определении основных задач исследований;

– теоретическом обосновании эффективности методов, потенциально пригодных для решения задач;

– анализе имеющихся аппаратурных комплексов, применимых для реализации поставленных задач, и выборе оптимальных из них.

В настоящее время для поиска подводных потенциально опасных объектов (ППОО), их идентификации и определения влияния на окружающую среду, геоэкологического мониторинга разных уровней, геоэкологического сопровождения освоения морских месторождений используются модульные информационно-измерительные системы [14].

Информационно-измерительная система (ИИС) представляет собой специализированную геоэкологическую систему, которая определяется как «Методико-технологическое объединение в единое целое измерительных, обрабатывающих, интерпретационных и визуализационных модулей для решения геоэкологических задач, содержащее группы основных измеряемых и изучаемых параметров, методику их наблюдений и технологические модули, обеспечивающие регистрацию сигналов, обработку первичной информации, предварительную интерпретацию, проведение комплексного анализа полученных материалов, моделирование и прогноз изменения сложившейся геоэкологической ситуации, формирование управляющих решений».

ИИС принципиально состоит из аппаратурно-методического и интеллектуально-информационного комплексов (рис. 1). Комплекс задач, решаемых морскими геоэкологическими работами, перечислен выше.

Как уже отмечалось, применяемый в настоящее время аппаратурно-методический комплекс включает в себя три основные группы методов: геофизические, геологические, аналитические.

В специальную группу можно выделить фототелевизионные, буйковые и осуществляемые с помощью подводных аппаратов наблюдения, лишь косвенно связанные с указанными группами.

Аппаратурно-методический комплекс иллюстрируется на рис. 2.

Дальнейшее развитие методов изучения геоэкологического состояния акваторий происходит путем создания облегченных модификаций, пригодных для работы на мелководье, замены определенных видов аналитических лабораторных наблюдений измерениями *in-situ* с помошью забортных датчиков информации. Также на повестке дня стоит судовое обеспечение морских геоэкологических работ и подводных аппаратов [4, 10].

Проведение геоэкологических и геолого-геофизических работ в море, в первую очередь в арктических морях, отличающихся наличием ледяного покрова, связано с рядом трудностей, важнейшие из которых: высокая вероятность обрыва забортных измерительных кабелей и спуско-подъемных несущих тросов, сложность маневрирования в ледяных полях. Эти проблемы могут быть устранены при использовании в качестве экспедиционных *судов-катамаранов,* прошедших успешные испытания в зарубежных исследованиях. Опыт привлечения обитаемых подводных аппаратов в Арктике показал их невысокую эффективность при решении геоэкологических задач. Среди необитаемых подводных аппаратов целесообразно отдать предпочтение глайдерам. *Глайдер* – автономный необитаемый подводный аппарат многократного использования, перемещающийся в водном пространстве по заданной программе с минимальным расходом энергии подобно планеру. Для движения глайдер использует гидродинамические силы, воздействующие на корпус, и рули при всплытии и погружении. Энергия собственных

источников расходуется только на изменение плавучести и дифферента для передвижения в толще воды по пилообразной траектории. Глайдер может входить в общий аппаратурно-методический комплекс и использоваться при решени любых геоэкологических задач.

В настоящее время при проведении геоэкологических работ на море используются плавсредства, созданные для проведения различных видов специализированных работ: аварийно-спасательные, вспомогательные – разной ведомственной принадлежности (отряды АСПТР пароходств, МЧС, военно-морской флот и др.); рыболовные; ледокольные; гидрографические. Основные виды морских

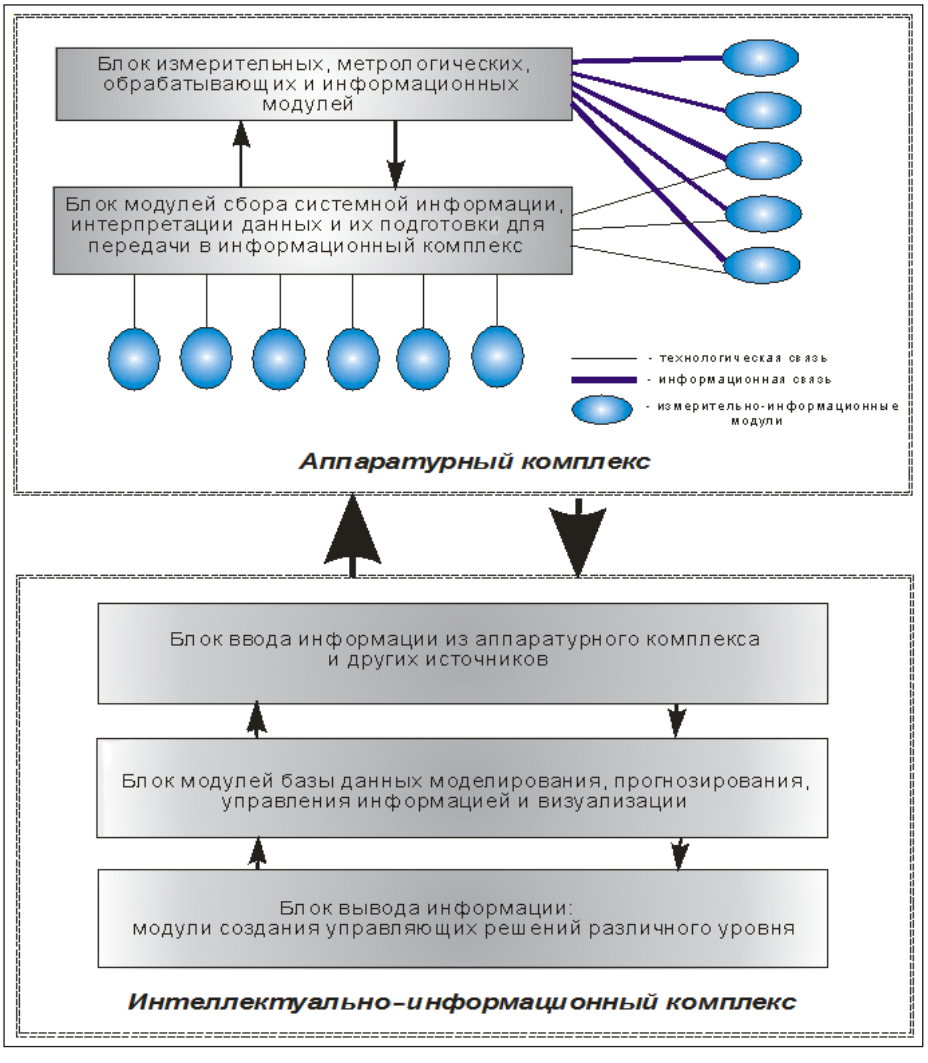

Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной системы

Рис. 2. Состав модулей комплексной измерительной системы, применяемой для геоэкологических исследований на море

геоэкологических исследований включают в себя: составную часть геолого-съемочных работ разного масштаба; геоэкологическое сопровождение освоения морских месторождений (нефтегазовых, строительных материалов, олова, золота, ильменит-рутил-цирконовых); поиски, обследование и изучение ППОО; мониторинг федерального, регионального и локального уровня (рис. 3). Специализированных судов, полностью или частично предназначенных для проведения геоэкологических работ, не существует.

Если в условиях незамерзающих морей эта проблема весьма существенна, то ее значение в замерзающих, в первую очередь арктических морях, где приходится иметь дело с длительным периодом наличия ледяного покрова, сокращающего время проведения исследовательских работ, повышается в несколько раз.

На данном судне мост, соединяющий корпуса катамарана, дает возможность легкого и экономическ

Рис. 3. Судно для обеспечения водолазных и подводно-технических работ, оптимальное для решения задач, связанных с геоэкологическими исследованиями

эффективного обустройства систем, механизмов и приспособлений для работы функциональных подсистем и различных подводных и опускных аппаратов. Многофункциональность судна катамаранного типа обеспечит увеличение площади рабочей палубы (являющейся ключевой характеристикой для описания эффективности судов обеспечения) до 2,5 раз по сравнению с однокорпусными судами, что позволит удобно размещать сменные контейнеризованные модули оборудования в зависимости от поставленных задач. Отметим также более удобное и безопасное выполнение геологического и гидрофизического пробоотбора, особенно тяжелыми трубками; удобное выполнение зондировочных работ зондами разных типов.

Катамаран обеспечивает более стабильное положение судна при работах в дрейфе и на якоре, значительно более удобное и надежное размещение контейнерных лабораторий. Важнейшим преимуществом катамаранов является то, что они позволяют избежать описанных выше сложностей проведения работ во льдах. Использование межпалубного пространства между корпусами судна позволяет избежать соприкосновения со льдом любых забортных устройств. Трос пробоотборников движется в этом пространстве, закрытом ото льда. Геофизические кабели, опускаемые в воду с использованием межпалубного пространства, оказываются по мере удаления от кормы судна ниже поверхности воды и, следовательно, ниже подошвы льдин любой конфигурации, находящихся за пределами корпуса судна. В этом случае и необходимое маневрирование судна среди льдин не нанесет урон забортным устройствам и подводящим кабелям.

Прогнозирование. Опыт создания прогнозных систем экологической направленности весьма ограничен [13–15]. Связано это с рядом причин: отсутствием концептуальных основ построения таких систем; сложностью создания единых систем, объединяющих подсистемы разной фактологической основы и целевой направленности; неразработанностью необходимого математического аппарата.

Наконец, если представление географических, океанологических, биологических данных в интегрированном банке данных – необходимой составляющей любой прогнозной системы – на сегодняшний день не является сложной задачей, то объединение в нем характеристик геоэкологической природы, морфологии, пространственно-временной структуры вызывает большие трудности. Это связано со сложностью оптимизации и минимизации большого объема разнородных данных, вводимых в ПС, а также ограниченным выбором специальных программных средств, терминологическими разночтениями и отсутствием иерархии управляющих решений [13–15].

Первый опыт создания прогнозной системы для анализа последствий кратковременного и долговременного воздействия ППОО на окружающую природную среду реализуется МЧС РФ в специализированном программном комплексе, направленном на изучение и ликвидацию чрезвычайных экологических ситуаций на море [14].

В настоящее время требуется создание основы современной версии прогнозной системы, ориентированной на долговременный прогноз развития геоэкологической ситуации при различных техногенных воздействиях на акватории.

Изучение ППОО и прогноз изменения геоэкологической ситуации в районах их нахождения. Начатые в 1992 г. комплексные геоэкологические и океано-

логические работы, выполняемые в целях поиска и обследования затопленного в Балтийском море немецкого трофейного химического оружия (НТХО), положили начало системному обследованию затопленных подводных объектов, представляющих угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций различного характера, и имели достаточно ограниченный набор методов. Со временем набор методов последовательно трансформировался, объекты и география поисков значительно расширились. Расширились и наши представления о ППОО, находящихся в разных морях, в принципиально разных геологических и океанологических условиях [14].

Были теоретически обоснованы требования к разрешающей способности методов, входящих в комплекс исследований [14]. Созданная для изучения ППОО аппаратура до последнего времени в основном позволяла успешно решать поставленные задачи. В процессе выполнения различных экспедиционных работ под эгидой МЧС и МПР РФ выявляются новые объекты, уточняются характеристики известных ППОО, идет накопление физико-химической, океанографической, инженерно-геологической информации по полигонам и районам затопления ППОО.

Создана развернутая классификация ППОО. Состояние различных ППОО, находящихся в Балтийском, Белом, Карском, Черном, дальневосточных морях, озерах Ладожском и Байкал, чрезвычайно различно. Многие из них составляют угрозу окружающей среде, и эта потенциальная опасность с течением времени увеличивается. Если само по себе расширение наших знаний о физико-химических и морфологических свойствах самих объектов идет достаточно быстро, то методика и технология работ почти не развиваются. Заимствованные из морской геологической съемки и способов изучения геохимических ландшафтов эти методика и технология явно не удовлетворяют требованиям сегодняшнего дня. Разрешающая способность основных методов исследований (сейсмоакустика, электрометрия, магнитометрия, фототелевизионные наблюдения) не удовлетворяет нас при поисках мелких и многоэлементных ППОО, расположенных часто в сложных инженерно-геологических условиях (иногда в аквальной мерзлой зоне), технически и пространственно труднодоступных участках дна (что, в частности, имеет место в интенсивно осваиваемых сейчас районах Черного моря).

Обеспечение одновременных измерений разных параметров ППОО и окружающей (вмещающей) среды, необходимость непрерывной долговременной их регистрации требуют своего технического развития. В настоящее время стало реальной необходимостью установление современных требований к аппаратурно-методическим комплексам и обоснование их развития в ближайшие годы с учетом развития системотехники и нанотехнологий.

Одним из важных направлений деятельности МЧС России является снижение рисков возникновения ЧС различного характера, а также сохранение здоровья людей, предотвращение ущерба и материальных потерь путем заблаговременного проведения предупредительных мер. Выполнение данной задачи рассматривается как приоритетное, поскольку позволяет прогнозировать ЧС на базе достоверных оценок риска, получаемых в результате мониторинга состояния окружающей среды и производственной сферы.

Прогнозная система – «совокупность программно-технических и интеллектуальных элементов, обеспечивающих выполнение моделирования, сбор и

обработку информации, ее визуализацию и принятие управляющих решений». Главная цель создания прогнозной системы (ПС) МЧС России – расширение возможностей функциональной подсистемы РСЧС по ППОО. ПС используется для информационной поддержки принятия управленческих решений. При этом многие оценки развития ЧС на ППОО основаны на экспертных оценках, так как более точный прогноз невозможен либо из-за недостатка информации, либо из-за неразработанности программных средств.

В число основных задач, решаемых ИИС, входят:

– поиск, уточнение положения и определение морфологии ППОО;

– изучение общей экогеологической ситуации в районе затопления ППОО и прогноз ее изменения;

– новое направление исследований «Подводная объектология»;

– моделирование динамических изменений положения ППОО;

– обоснование управляющих решений.

Успехи, достигнутые при изучении ППОО разного типа, позволили создать новое научное направление в морских геоэкологических исследованиях – *подводную объектологию.* Оно определяется так: «Подводная объектология – наука, изучающая подводные объекты, расположенные на дне акваторий, в донных осадках или гидросфере, имеющие выраженные границы и отличающиеся по своим характеристикам от окружающей среды».

Мониторинг геологической среды, как и любой другой вид экологического мониторинга, является самостоятельной категорией исследований. По сути дела, эта категория развивается и трансформируется в области понятий, систем измерений, методик работ, способов отображения информации в ином пространственно-временном поле, нежели другие виды геолого-экологических исследований.

Существует много различных классификаций мониторинга, построенных по пространственно-временному (масштаб работ, особенности изучаемых площадей, временной спектр проведения повторяющихся наблюдений), целевому (фоновый, биосферный, экогеохимический, экодинамический и т. д.) или генетическому (по влиянию на геосистему группы эндогенных или экзогенных факторов и процессов) принципам [1, 5, 8, 9, 12].

В настоящее время широко используется данное нами определение: «Мониторинг окружающей природной среды – это геоинформационная интеллектуальная система с широким набором разнообразных модулей, обеспечивающая сбор и обработку информации, полученной в выбранном пространственно-временном поле, дальнейшую интерпретацию материала, моделирование, прогноз и принятие управляющих решений».

Интеллектуальная геоинформационная система предусматривает в качестве основных элементов ее строения две подсистемы: 1) *ввода* – состоящую из информационных модулей, модулей управления информацией, визуализации и моделирования; 2) *вывода* – представленную управляющими решениями. Важным элементом является новая организация подсистемы ввода, включающая в себя не только атрибутивную и графическую базы данных, но и технические средства, обеспечивающие получение цифровой обработанной информации.

В качестве объектов мониторинга следует рассматривать:

– активизацию современных неотектонических движений, обусловленную как эндогенными проявлениями сейсмической активности, так и экзогенными, в том числе техногенными, факторами;

– изменения гидрогеологической и геотермальной обстановок любого масштаба под влиянием глобальных процессов (потепление климата, изменение уровня Мирового океана и т. д.) и техногенного воздействия;

– трансформацию литодинамического режима в прибрежно-шельфовых зонах в результате проявления как региональных, так и локальных природных и антропогенных факторов;

– антропогенное загрязнение и техногенные нарушения геологической среды континентального шельфа.

Учитывая многоцелевую направленность мониторинговых работ, целесообразно подразделять их на полные, неполные, специализированные и моноинформативные. Первые включают в себя полный стандартный набор (СН) геоэкологических исследований на шельфе. Вторые предполагают частичное использование методов стандартного набора. Специализированный мониторинг ориентирован на привлечение ограниченного перечня методов из СН и применение нестандартных модификаций из СН и/или нетрадиционных видов работ. Наконец, моноинформативные мониторинговые работы предполагают использование одного метода, позволяющего полностью решить поставленную задачу.

Примером неполных мониторинговых работ может служить изучение динамики геоэкологических барьеров, формирующихся на участках разработки месторождений нефти, газа или строительных материалов. Специализированный мониторинг может осуществляться в районах захоронения на дне моря отравляющих веществ или иных объектов, на акваториях подводных отвалов, на участках строительства гидротехнических сооружений, а также в зонах субмаринной разгрузки и прочее. Наконец, объектом моноинформативного мониторинга может быть, например, интенсивность коррозионного процесса на подводных элементах нефтяных терминалов и выявление его динамики.

Очень важной является структура организации мониторинга разного уровня. На наш взгляд, в достаточной степени оптимальной является иерархическая структура, реализуемая в Финляндии. На самом верхнем уровне находится Министерство окружающей среды. В части мониторинга оно отвечает за единую политику всех организаций, выполняющих мониторинг любого уровня. Оно занимается подготовкой законопроектов и финансированием государственных организаций, установлением норм и стандартов. Следующим по уровню является Центр окружающей среды Финляндии (ЦОСФ), представляющий собой общегосударственную научно-исследовательскую структуру развития и разработок. Центр проводит мониторинг, делает заключения по экологическому состоянию территорий и предлагает управляющие решения, в которые входят планы, программы, модели, предназначенные для улучшения состояния окружающей среды. ЦОСФ регулирует деятельность региональных центров окружающей среды.

Таких центров в Финляндии 13, три из них осуществляют мониторинг геологической среды на шельфе. При проведении мониторинга эти центры руководствуются требованиями как регионального, так и общегосударственного статуса.

Низшее звено представлено муниципальными органами власти, отвечающими за охрану окружающей среды на местах. В их задачи входит проведение мониторинга локального и объектного уровней. К сожалению, в Российской Федерации четкая структура и организация проведения мониторинга окружающей природной среды как в целом, так и, в частности, на континентальном шельфе отсутствует.

В основе мониторинга любого уровня лежат измеряемые параметры:

1. Физические – прозрачность, цветность, плотность, электропроводность, температура, вязкость, диэлектрическая проницаемость морской воды, скорость постоянных и непостоянных течений, глубина моря, петрофизические характеристики техногенных объектов и вмещающих сред.

2. Химические и физико-химические – растворенный кислород, химические элементы (прежде всего тяжелые металлы: Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Co и др.), нефтяные углеводороды, полициклические ароматические углеводороды, битуминозные вещества, гуминовые кислоты, пестициды, радионуклиды, pH, Eh.

3. Биологические – состав и биомасса основных компонентов планктона и бентоса, продукция бактерий, скорость потребления и время оборота фосфатов; скорость сульфатредукции; усвояемость органического вещества, скорость его деструкции в воде и время оборота (полного самоочищения); фильтрационные потенциалы; хлорофилл; фотосинтетическая активность; количество и состав фитопланктона; биолюминесценция зоопланктона; зависимость суточной и сезонной миграции планктона от физических и химических факторов.

4. Литологические и литодинамические – мощность и состав техногенных горизонтов, состав и скорость перемещения взвеси, характеристики геоэкологических барьеров.

5. Объектные – морфологические параметры техногенных объектов, расположенных на дне моря и в донных осадках, другие характеристики (состав отравляющих веществ, находящихся в затопленных контейнерах и бомбах, состав захораниваемых материалов и т. д.).

Существует много подходов к созданию оптимальной схемы мониторинговых работ, их иерархии; типизации, объединяющей задачи, уровни, методики проведения измерений; к способам отображения конечной информации. Общие методические приемы проведения измерений сводятся к их выполнению в режиме зондирования или профилирования при дискретной или непрерывной регистрации сигналов и записи информации в цифровом или аналоговом виде. Однако если при выполнении любых видов геоэкологических работ измерения, проводимые в режиме движения экспедиционного судна и на его дрейфовых и якорных стоянках, то есть в модификациях профилирования и зондирования, являются вполне равнозначными, то при постановке мониторинга предпочтение должно отдаваться вторым. Причиной этого является необходимость очень точной привязки мониторинговых наблюдений, особенно на моноинформативном и специализированном уровнях. Кроме того, выполнение основного объема работ в модификации зондирования обеспечивает отображение информации в трехмерном пространстве.

Развитие технологии выполнения мониторинговых измерений идет по пути сокращения объема пробоотбора и аналитических наблюдений, выполняемых на борту судна и в стационарных лабораториях, и увеличения количества измерений

в режиме *in-situ* при движении судна или на якорных и дрейфовых стоянках при перемещении забортных измерительных модулей в субвертикальном или субгоризонтальном направлениях.

Важнейшими вопросами, связанными с проведением мониторинга, являются временные и пространственные критерии, определяющие выбор оптимального комплекса методов, способов наблюдений, точности геодезической привязки.

Мониторинг геологической среды шельфа является динамической, в известной степени самоорганизующейся системой. Суть ее самоорганизации состоит в том, что принимаемые на разных этапах управляющие решения не только касаются прогноза экологической ситуации и комплекса мер по ее стабилизации или изменению, но и позволяют постоянно совершенствовать методику и технологию работ, уровень визуализации результирующих материалов и т. д.

Современное состояние нормативной базы морских геоэкологических работ

В развитых странах экологическая деятельность на море осуществляется не столько через национальные и международные стандарты, сколько через нормативы, разрабатываемые государственными и негосударственными структурами под эгидой министерств по окружающей среде. Основное внимание уделяется контролю за различными группами загрязнителей и системам мер борьбы с ними [5, 16].

Следует отметить, что «нормы» на различные ассоциации загрязнителей морской среды меняются в странах Евросоюза в зависимости от доминирующих в настоящее время видов хозяйственной деятельности. Интенсификация химических производств в береговой зоне обусловливает появление документов, приоритетно ориентированных на органические загрязнители; разработка шельфовых углеводородных месторождений сместит акценты в область контроля за содержанием тяжелых металлов и нефтепродуктов.

Варианты взаимодействия норм государственного регулирования хозяйственной деятельности на море в части экологии на уровне национальных и международных стандартов отличаются большим разнообразием. В Германии все, что касается экологических условий использования недр и подземных сооружений, регулируется документами уполномоченных организаций, а не национальными стандартами. В Канаде экологические вопросы регулируются документами комиссии при министерстве энергетики. В США вся федеральная регулятивная экологическая деятельность на море находится под контролем Конгресса и специальной комиссии при президенте США. Все геоэкологическое регулирование хозяйственной деятельности на шельфе Финляндии поручено полугосударственному агентству по мониторингу окружающей среды, имеющему региональные и муниципальные отделения. Деятельность агентства регулируется министерством окружающей среды.

Структуризация нормативных документов, регламентирующих освоение нефтегазовых месторождений. Федеральные законы направлены на решение следующих задач: а) сохранение природной среды на основе учета ее фоновых характеристик и использования технологий, направленных на достижение этой цели; б) разработку нормативно-правовых документов, обеспечивающих на всех

уровнях выполнение поставленной цели: минимизации ущерба от производственной деятельности, а также проведение контроля, мониторинга и принятие управляющих решений; в) выбор методики проведения контроля и мониторинга.

Действующая система включает в себя:

– законодательные акты Российской Федерации;

– нормативные документы органов федеральной исполнительной власти (Минпромэнерго России, МПР России, Минрегион России, Ростехнадзор и др.);

– нормативные документы органов власти субъектов Российской Федерации (Правительства Татарстана, ХМАО – Югра, ЯНАО и др.);

– государственные стандарты системы ГОСТ Р;

– межгосударственные стандарты стран СНГ системы ГОСТ;

– стандарты вертикально интегрированных компаний или естественных монополий (ОАО «Газпром», ОАО «АК "Транснефть"», ОАО «НК "Роснефть"» и др.);

– стандарты организаций (эксплуатирующие и сервисные предприятия, общественные организации, институты и т. д.);

– технические условия (ТУ, СТУ) на продукцию;

– технические требования к проектам, процессам.

Низкая актуальность и эффективность значительной части стандартов является общей «болезнью» для многих стран, в которых национальные стандарты разрабатывались за счет государственных бюджетов. На место выбывших стандартов должны прийти нормы с более актуальной тематикой, в первую очередь путем перевода в национальные стандарты нормативных документов и рекомендаций органов исполнительной власти, содействующих выполнению технических регламентов.

Межгосударственные стандарты СНГ продолжают разрабатываться и приниматься в рамках системы ГОСТ. За период 2001–2004 гг. разработано 10 межгосударственных стандартов ОКС 75.180 «Оборудование для нефтяной и газовой промышленности»: 6 разработаны и представлены Республикой Азербайджан, еще 4 – Россией. В течение 10 лет российская нефтегазовая отрасль участвует в программах гармонизации государственных стандартов ГОСТ Р с признанными международными стандартами: до 2000 г. это были стандарты API (Американский институт нефти), ANSI (Американский национальный институт стандартов), после 2000 г. – ISO (Международная организация по стандартизации). По линии Госстандарта через технические комитеты осуществлялся 100%-й мониторинг и экспертиза разработки и корректировки всех стандартов ISO (ТС/67 – технический комитет/67).

Практически все стандарты ISO, относящиеся к нефтегазовой отрасли, имеют официальный перевод на русский язык и достаточно полно используются в проектах, при изготовлении оборудования и т. д. Международные стандарты отличаются очень высоким качеством и в случае соблюдения всех принятых формальных процедур могут быть приняты в качестве национальных стандартов.

Заключение

Итак, на сегодняшний день в сфере геоэкологических работ на море необходимо решить следующие основные задачи.

Создание и утверждение на государственном уровне инструкций по проведению геоэкологической съемки разных масштабов, по выполнению мониторинга окружающей морской среды, усовершенствование аппаратурно-методических комплексов в области расширения спектра параметров, изучаемых *in-situ*, повышения комплексности буйковых станций и подводных аппаратов, руководства по построению геоэклогических морских карт, развитие судового обеспечения, дальнейшее развитие прогнозирования в направлении создания многопараметровой и многовариантной системы, учитывающей во временном и пространственном плане очень большой набор факторов, обеспечивающих прогноз развития экологического состояния природно-техногенных и техногенных номинаций. Система может быть создана на кибернетической основе, позволяющей отвергнуть интуитивные экспертные оценки и решить вопрос в рамках научного направления структурирования сложных многопрофильных моделей.

За последние 15 лет издан ряд крупных монографий, посвященных морским геоэкологическим исследованиям. Эти монографии весьма подробно освещают историю, современное состояние и будущее развитие геоэкологических исследований на море, очень кратко описанные в данной статье.

Литература

1. *Айбулатов Н.А.* Экологическое эхо холодной войны в Российской Арктике. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 307.
2. *Андросова Н.К.* Геолого-экологические исследования и картографирование (Геоэкологическое картирование): учеб. пос.. – М.: Изд-во РУДН, 2000. – 311 с.
3. *Арктика* на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии). – СПб.: Наука, 2000. – 247 с.
4. *Волошин В.И.* Загрязнение морской среды судами. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 272 с.
5. *Ефремкин И.М., Холмянский М.А.* Геоэкологическое сопровождение освоения нефтегазовых месторождений арктического шельфа. – СПб.: Недра, 2008. – 316 с.
6. *Загрязнение* Арктики: доклад о состоянии окружающей среды Арктики // Программа арктического мониторинга и оценки / пер. с англ. – СПб.: Гидрометеоиздат, АМАП, 1998. – 188 с.
7. *Иванов Г.И.* Геоэкология Западно-арктического шельфа России: литолого-экогеохимические аспекты. – СПб.: Наука, 2006. – 303 с.
8. *Информационный* бюллетень № 9. Состояние геологической среды континентального шельфа Балтийского, Белого и Баренцева морей // Севморгео. 2007. – 57 с.
9. *Матишов Г.Г. и др.* Проблемы и методы экологического мониторинга морей и прибрежных зон Западной Арктики. – Апатиты: ММБИ, 2001. – 278 с.
10. *Морехозяйственный* комплекс России. – СПб.: РГО, 2005. – 273 с.
11. *Опекунов А.Ю., Холмянский М.А., Куриленко В.В.* Введение в экологию шельфа. – СПб.: Изд. СПбГУ, 2000. – 175 с.
12. *Патин С.А.* Нефть и экология континентального шельфа. – М.: ВНИРО, 2001. – 247 с.
13. *Холмянский М.А., Алхименко А.П.* Экологическая безопасность при освоении нефтегазовых месторождений на шельфе Карского моря. – СПб.: СПбГУ, 2004. – 160 с.
14. *Холмянский М.А., Владимиров М.В., Снопова Е.М.* Подводная объектология. – СПб.: Недра, 2016. – 310 с.
15. *Aspinall R.* Environmental GIS and Data Analysis. ISBN: 0471 98564 3, 2002, 224 s.
16. *Scott S.* International Standards hand book, NY, 2002.
17. *Understanding* sustainable architecture. NY, 2003.

УДК 551.576.1:614.842

В.Н. Козлов, А.П. Доронин**, В.М. Петроченко***

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И МЕТОДЫ ЕЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

* Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова; ** Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, doronin52@mail.ru

V.N. Kozlov, A.P. Doronin, V.M. Petrochenko

ECOLOGICAL DANGER FROM FOREST FIRES AND METHODS OF THEIR PREVENTION

В статье рассматриваются вопросы, связанные с разработкой методов искусственного вызывания осадков из конвективных облаков и создания искусственной перистой облачности. Сделан вывод о целесообразности использования предлагаемых методов в целях тушения лесных пожаров и профилактики их возникновения.

Ключевые слова: *конвективные облака, лесной пожар, искусственные осадки, искусственное вызывание осадков.*

To reduce ecological danger from forest fires the questions connected with the development methods of artificial rainmaking from convective clouds and creation of artificial cirrus cloud are given. Conclusion about using of proposed methods to put up the forest fires and to except them formation is made.

Keywords: *convective clouds, forest fire, artificial rainfall, artificial rainmaking.*

Введение

Лесные пожары являются одной из трудно решаемых проблем народного хозяйства. По статистическим данным лесные пожары уничтожают в год до 70 млн м^3 древесины и до 700 тыс. га лесных насаждений. Основными причинами возникновения лесных пожаров являются: а) засуха и нарушение правил пожарной безопасности в лесу и на прилегающих территориях; б) самовозгорание лесной подстилки в результате преломления солнечных лучей в осколках стекла или самовозгорание торфа под действием микроорганизмов в присутствии кислорода при влажности торфа ниже 40 %; в) грозовые разряды над лесными территориями при прохождении фронтальных разделов и другие причины.

Помимо экономического ущерба, пожары оказывают влияние на региональную погоду и климат: при действии крупных пожаров или многих небольших

пожаров в регионах формируются устойчивые области высокого давления, сопоставимые по масштабам с атмосферными барическими системами. Циклоны обходят эти участки стороной, формируя в местах пожаров еще более сухую и жаркую погоду. Потепление климата на планете сопровождается возникновением и значительной продолжительностью лесных пожаров в северных регионах планеты, что приводит к дополнительным выбросам CO_2, черного углерода (сажи), оксида азота, воздействие которого на атмосферу значительнее CO_2, и других вредных примесей и, соответственно, к ускорению климатических изменений. В статье рассматриваются экологические последствия лесных пожаров и методы их тушения и предотвращения.

Лесные пожары на всей планете являются стихийным бедствием, наносящим существенный ущерб народному хозяйству. Крупные лесные пожары возникают 1–3 раза в десятилетие. Особенно многочисленными они были в XX столетии: в 1901, 1908, 1910, 1912, 1915, 1921, 1932, 1934, 1936, 1938, 1955, 1958, 1966, 1972, 1975, 1976, 1984 гг. [2]. Катастрофические лесные пожары с десятками крупных очагов наблюдаются гораздо реже. Особенно высокая горимость лесов наблюдалась в 1915, 1921, 1972, 1976, 2010 гг.

Предотвращение лесных пожаров является приоритетным направлением лесоохраны, так как снижается риск возникновения и минимизируются затраты на тушение лесных пожаров. Не вызывает сомнения то, что пожар легче предотвратить, нежели потушить. Мониторинг лесных территорий включает в себя определение класса пожароопасности (КПО) лесов, проведение профилактических работ наземными службами, снижение КПО лесов искусственно вызванными осадками (ИВО) и другие мероприятия [1, 3, 8, 9, 11].

Существующие методики оценки лесопожарной обстановки [3] позволяют определить площадь и периметр зоны возможных пожаров в регионе (области, районе). Исходными данными являются значения лесопожарного коэффициента и время развития пожара. Значение лесопожарного коэффициента зависит от природных и погодных условий региона и времени года. Решение лесопожарной проблемы тесно связано с решением целого ряда организационных и технических задач. В первую очередь это проведение противопожарных и профилактических работ, осуществляемых в плановом порядке и направленных на предупреждение возникновения, распространения и развития лесных пожаров, в том числе ИВО [1, 8, 9, 11].

Синоптические процессы, благоприятствующие возникновению пожаров

В России изучение влияния атмосферных процессов на возникновение лесных пожаров было начато Г.Я. Вангенгеймом, который предложил прогнозировать возникновение и развитие лесных пожаров по пяти типам погодных условий и ввел 17-балльную шкалу для оценки пожарной опасности погоды для леса. Более поздние исследования подтвердили тесную связь пожарной опасности в лесу с антициклоническим характером погоды [2]. Наиболее значимые пожароопасные ситуации возникают при прохождении холодных фронтов, вызывающих сильные ветры. Усиление пожарной опасности лесов связано с нисходящими движениями воздуха на большой площади (антициклональный характер погоды), сопровождающимися быстрым повышением температуры и уменьшением относительной

влажности. Не менее сложная пожароопасная обстановка создается в теплых секторах циклонов, сменяющих антициклоны.

В непродолжительный период смены барических образований пожары развиваются и распространяются значительно быстро. Этому способствуют смена термической стратификации атмосферы с устойчивой на неустойчивую, развитие конвекции в атмосфере, увеличение высоты подъема конвективной колонки, усиление ветра в основании конвективной колонки и, как следствие, интенсивности пожара. Площадь пожаров при таких синоптических ситуациях за 2–3 дня может увеличиваться в десятки раз, а пожары становятся стихийным бедствием.

В Сибири и на Дальнем Востоке большинство лесных пожаров возникает в малоградиентных барических полях, в которых не наблюдаются сильные ветры, но характерны высокие температуры и низкая относительная влажность для пониженного давления, а для повышенного давления – прохождение холодных фронтальных разделов с грозами, сопровождающимися порывистыми ветрами и незначительными осадками.

Синоптические положения, при которых создается наивысшая пожарная опасность и наблюдаются лесные пожары, развивающиеся до крупных размеров, можно подразделить на четыре типа:

– обширный антициклон с прохождением по его периферии теплого фронта;

– глубокий циклон с фронтом окклюзии в теплом секторе;

– прохождение теплых фронтов при малоградиентных барических полях пониженного давления;

– прохождение холодных фронтов при малоградиентных полях повышенного давления.

Предвестниками крупных пожаров считаются некоторые типичные черты погоды, предшествующие пожароопасному периоду: сухая осень предшествующего года, малоснежная и холодная зима, ранняя и холодная весна [2, 9].

Сведения о лесных пожарах указывают на то, что грозы являются одной из причин возникновения лесных пожаров. Географическое распределение гроз над сушей определяется характером температурно-влажностного режима, циркуляцией атмосферы и рельефом местности.

Анализ повторяемости числа дней с грозами показал, что существуют очаги повышенной грозовой активности и зоны малого числа дней с грозой [9].

Для принятия решения по ИВО анализируют синоптическое положение, данные температурно-влажностного радиозондирования, распределение ветра по высотам, наличие положительной энергии неустойчивости в атмосфере, уровень конденсации (вероятную нижнюю границу облаков) и уровень свободной конвекции (вероятную верхнюю границу облаков), а также знакомятся с прогнозом развития конвективной облачности. При отсутствии этих данных по картам барической топографии (АТ850, АТ700 и АТ500) в районе работ определяют скорость перемещения облаков (как правило, она равна 0,8 скорости ветра на АТ700) [8, 11].

К районам проведения работ по ИВО относятся территории лесного фонда, на которых своевременная ликвидация лесных пожаров не может быть обеспечена существующими наземными силами и средствами пожаротушения [8, 11]. ИВО в профилактических целях при отсутствии лесных пожаров проводят для

снижения класса пожарной опасности, когда расчетная мощность облаков по прогнозу оказывается более 2–2,5 км.

Наиболее благоприятные условия для проведения работ по ИВО отмечаются, когда нижние слои воздуха имеют значительную влажность (более 60 %), ветры слабые или полностью отсутствуют, местами были дожди конвективного происхождения, над районом работ по высотам наблюдаются градиенты температуры больше влажноадиабатических. ИВО над районом работ для тушения очагов лесных пожаров целесообразно проводить в следующих синоптических ситуациях: область пониженного давления (малоградиентное барическое поле), приближение фронтальных разделов, ложбина, слабовыраженные фронтальные разделы типа вторичных холодных фронтов или фронтов окклюзий [11]. ИВО проводить нецелесообразно, если в районе работ наблюдается усиливающийся антициклон (давление у земли растет), энергия неустойчивости отрицательная, на высотах наблюдается конвергенция ветра, градиенты температуры в нижней тропосфере меньше влажноадиабатических [8, 11].

В горимости лесов России грозы играют немаловажную роль. По многолетним данным «Авиалесоохраны» количество лесных пожаров от гроз колеблется от 6 до 20 % от всех лесных пожаров. В отдельные годы в лесах Западной Сибири от молний возникало 70–80 %, а в лесах севера европейской части России – до 40–60 % всех пожаров. Наиболее часто пожары от гроз возникают на территориях Томской и Тюменской областей, Алтайского края, в Приангарье и Забайкалье, Якутии и других регионах Дальнего Востока [6]. Особенностью лесных пожаров, возникших от гроз, является одновременное их возникновение во многих местах. Синхронность указанных явлений обычно прослеживается в период засух, когда устанавливается высокая пожарная опасность с КПО 3–5 классов. Выпадающие при грозах осадки неравномерны по площади и незначительны по величине, и в большинстве случаев они не снижают степень пожарной опасности в лесу.

Грозы наблюдаются в основном при 3 классе КПО. Анализ возникновения лесных пожаров от гроз показывает, что их возникновение связано с прохождением вблизи очагов пожаров холодных фронтов при значительном прогреве приземного слоя воздуха и наличии холодного воздуха на высотах. Следует подчеркнуть, что возникновение лесных пожаров чаще всего наблюдается при сухих грозах. Этому, как правило, предшествует сухая погода, наблюдаемая при высоких метеорологических комплексах, определяющих КПО. Термодинамические условия для развития конвекции сохраняются, а израсходованные влагозапасы воздушной массы не восполняются в количестве, достаточном для образования осадков.

Экологический и социальный ущерб от лесных пожаров

Опасность лесных пожаров для людей связана не только с прямым действием огня, но и с большой вероятностью отравления из-за сильного обескислороживания атмосферного воздуха, резкого повышения концентрации угарного газа, окиси углерода и других вредных примесей. По данным многолетней статистики, 90 % пожаров вызвано антропогенными факторами при возникновении засушливых явлений. Так, засуха 2010 г. послужила причиной возникновения наиболее крупных лесных пожаров в истории России. В европейской части страны с середины июня

2010 г. более двух месяцев стояла аномальная жара и засуха, создавшая благоприятные условия для развития лесных пожаров. Всего с начала пожароопасного периода 2010 г. в России произошло более 29 тыс. природных пожаров на общей площади 927,5 тыс. га. В пожарах погибли более 50 человек, сгорели 2,5 тыс. домов. По данным Всемирного центра мониторинга пожаров, площадь, пройденная пожарами на природных территориях России с начала 2010 г. по 13 августа, составила не менее 10–12 млн га [13]. Пожары затронули не менее 60 федеральных заповедников и национальных парков, уничтожив реликтовые леса и другие эталонные экосистемы, был нанесен непоправимый урон популяциям редких видов растений и животных.

По данным Рослесозащиты, с середины июня до начала августа 2010 г. были зарегистрированы лесные пожары на площади 3900 га земель, загрязненных радионуклидами, в т. ч. в Брянской (33 пожара на площади 269 га), Калужской (11 пожаров на площади 173 га), Тульской (6 пожаров на площади 44 га), Орловской (3 пожара на площади 13 га), Пензенской (34 пожара на площади 82 га), Челябинской (401 пожар на площади 1431 га) и Курганской (12 пожаров на площади 63 га) областях [13]. В результате лесных и торфяных пожаров в России в 2010 г., по оценке геобиоцентра Мюнхенского университета (Германия), в атмосферу планеты было выброшено от 30 до 100 млн т двуокиси углерода [13]. Эмиссия CO_2 от лесных пожаров будет наблюдаться и в последующие годы за счет разложения поврежденной огнем, но не сгоревшей биомассы. По экспертным оценкам, общий выброс углекислоты от пожаров 2010 г. может составить 400 млн т (эквивалентно 18 % годовых антропогенных выбросов парниковых газов в России). Трудно определить стоимость основных экосистемных услуг, которые предоставляли сгоревшие леса (поглощение двуокиси углерода, выделение кислорода, защита почв и водоемов и др. [13]). В результате пожаров также ухудшается санитарное состояние выживших древостоев, увеличивается глубина промерзания почвы (в связи с ликвидацией лесной подстилки), усиливается поверхностный сток и водная эрозия на больших территориях, повышается вероятность наводнений при выпадении обильных осадков и быстром снеготаянии.

Интенсивное задымление при пожарах 2010 г. (иногда видимость не превышала 30–50 м) затронуло все регионы Центрального федерального округа. Как известно, вещества, содержащиеся в дыме от торфяно-лесных пожаров, наносят ущерб здоровью населения. Так, по данным Минздравсоцразвития [13], в июле 2010 г. число смертей по России в годовом исчислении выросло на 8,6 % (в январе–июне смертность сокращалась). В некоторых из охваченных пожарами и/или задымлениями регионах смертность в июле 2010 г. (по сравнению с июлем 2009 г.) существенно возросла: в Москве – на 50,7 %; в Ивановской обл. – на 18,3 %; в Московской и Тульской обл. – на 17,3 %; в Республике Татарстан – на 16,6 %; в Рязанской обл. – на 13,5 %; в Ульяновской обл. – на 13 %; в Тамбовской обл. – на 11,1 %; в Липецкой обл. – на 9 %; в Республике Мордовия – на 6,8 %. При этом в целом за период с января по июль 2010 г. смертность в России снизилась на 0,3 %. В ряде областей, где наблюдалась высокая температура, но отсутствовало интенсивное задымление, смертность в июле снижалась или увеличивалась незначительно (в Белгородской обл. – рост на 2,6 %, в Кировской обл. – рост на 1,1 %, в Воронежской обл. – рост на 0,7 %, в Волгоградской обл. – снижение на 4,4 %, в Ставропольском

крае – снижение на 3,6 %). Это говорит о том, что увеличение смертности населения летом 2010 г. было связано с пагубным воздействием задымления от многочисленных лесных пожаров.

По данным департамента здравоохранения правительства Москвы, на 9 августа 2010 г. дополнительная ежедневная смертность от аномально высокой температуры и задымления в Москве достигала 320–340 человек. Вызовы скорой помощи и число обращений к врачам увеличились на 20 %. Общее число госпитализаций увеличилось на 10 %, госпитализаций детей — на 17 %. Основные причины обращений – сердечно-сосудистые патологии, бронхиальная астма, гипертоническая болезнь, проблемы с легкими. В больницах были запрещены плановые хирургические операции. Подобная картина наблюдалась и в других областях, подвергшихся негативному воздействию лесных пожаров. Например, в г. Тольятти (Самарская обл.) в дни сильного задымления число вызовов скорой помощи в среднем увеличивалось в 1,5 раза (от 600–650 до 1060 в сутки) [13].

Наиболее подробные данные по влиянию длительного задымления от лесных пожаров на здоровье населения представлены по Хабаровскому краю [13]. Так, после четырех месяцев задымления в 1998 г. в течение двух лет наблюдался устойчивый рост заболеваемости в Комсомольске-на-Амуре по многим классам болезней. Возвращение к допожарному уровню произошло лишь через четыре года.

Основные факторы, определяющие формирование ресурсной облачности для искусственного вызывания осадков

Искусственно вызванные осадки являются основным средством тушения лесных пожаров в таежной зоне и труднодоступной горной местности. В связи с тем, что необходимая для этих целей ресурсная облачность не всегда наблюдается при пожарах, основное значение приобретают профилактические работы по снижению класса пожарной опасности лесов.

Пространственное распределение облачности, ее вертикальная протяженность, суточный и сезонный ход, а также другие характеристики обусловливаются взаимодействием ряда факторов, основными из которых являются характер циркуляционных процессов и свойства подстилающей поверхности. В результате циркуляционных процессов формируются воздушные потоки, переносящие водяной пар на большие расстояния по горизонтали, и крупномасштабные вертикальные движения, приводящие к вертикальному подъему влаги во всей толще тропосферы. Следствием этих процессов являются процессы облакообразования и осадкообразования, обеспечивающие влагооборот воды в системе «Земля – атмосфера».

На территории Российской Федерации по преобладающему горизонтальному переносу воздушных масс выделяют три крупные климатические области: атлантическую, арктическую, тихоокеанскую. Последние, в свою очередь, подразделяются на более мелкие климатические районы и подрайоны, которые существенно различаются по режиму облачности и осадков.

Область атлантического переноса распространяется на европейскую часть России и Западную Сибирь. Европейская часть Российской Федерации относится к атлантико-континентальным и континентальным районам. Летом в этих районах на фронтах развивается циклоническая деятельность, которая обусловливает

развитие облаков и частое выпадение осадков. В эти районы проникает и тропический воздух, влага которого служит существенным дополнением к осадкам атлантических циклонов. Однако это влияние не распространяется на юго-восточные районы европейской части Российской Федерации, для которых характерны засухи и суховеи.

На территории Западной Сибири также можно выделить несколько районов с различным режимом облачности и осадков, но, в отличие от европейской части, климатические изменения с запада на восток в этой области происходят медленнее. Последнее обусловлено тем, что Западная Сибирь находится под влиянием не только Атлантики, но и обширного Азиатского континента. Область арктического переноса распространяется на территорию Восточной Сибири. Для нее характерны вторжения арктических воздушных масс, которые затем трансформируются и приобретают свойства континентальной воздушной массы. Сюда не проникает ни атлантический, ни тихоокеанский воздух.

Область тихоокеанского переноса распространяется на территорию Дальнего Востока. Однако циркуляционные процессы, развивающиеся над Тихим океаном, не имеют тенденции к продвижению на запад, в глубь континента, так как этому препятствуют горы. Поэтому на Дальнем Востоке основная роль в формировании климата и, следовательно, режима облачности и осадков принадлежит циркуляционным процессам. Сезонная смена океанических масс обусловливает сухую зиму и дождливое лето.

Наряду с общей циркуляцией, весьма важным климатическим фактором является рельеф. Хотя он и относится к факторам местного значения, однако нередко играет решающую роль в формировании пространственно-временного распределения облаков. Масштабы воздействия рельефа на климат зависят от высоты и протяженности горной системы. Все горные хребты обостряют циклоническую деятельность и увеличивают облачность. Различия в формах рельефа обусловливают более сложное и разнообразное распределение всех метеорологических величин. Так, над возвышенностями повторяемость конвективной облачности больше, чем над долинами и котловинами. Имеются различия в суточном и годовом ходе облаков для станций, расположенных в долинах и предгорьях. Наличие окраинных морей и крупных водоемов в теплый период приводит к ослаблению конвекции и, следовательно, к уменьшению повторяемости конвективных облаков.

Области существенно различаются не только по характеру циркуляционных процессов, но и по свойствам подстилающей поверхности. Так, основную часть территории Западной Сибири занимает Западно-Сибирская равнина, и только с юго-востока она окаймлена горами. Восточная Сибирь представляет собой горную страну. Территория Дальнего Востока также может быть охарактеризована как горная страна, на которой равнины располагаются только в межгорных впадинах, вдоль морских побережий и долин крупных рек.

Возникновение лесных пожаров происходит весной после схода снежного покрова. В Сибири и на Дальнем Востоке различают два типа пожароопасных сезонов: продолжительный непрерывный, когда горимость сохраняется 5–7 месяцев, и короткий непрерывный с максимумом в летние месяцы. Первый сезон характерен для южной тайги, второй – для средней и северной тайги. Одним из

показателей возникновения крупных лесных пожаров (для Сибири площадь пожара 200 га и более, для европейской части Российской Федерации – 25 га и более) считают число дней без осадков по сезонам: весна, лето, осень.

В весенний пожароопасный период крупные пожары возникают при 10–20-дневном засушливом периоде, в летний период – при 20–30-дневной засухе, в осенний период – при 20–40-дневном отсутствии осадков. Максимум крупных пожаров возникает весной после 30–40-дневного, летом и осенью – после 40–50-дневного периода без осадков [9, 10]. Окончание пожароопасного сезона приходится на конец осени, когда устанавливается устойчивый снежный покров.

Очевидно, что перечисленные факторы – циркуляция атмосферы и характер подстилающей поверхности, взаимодействуя, создают весьма сложную картину географического распределения кучево-дождевых облаков как по территории, так и от года к году и внутри пожароопасного сезона. В связи с этим целесообразно рассматривать закономерности распределения кучево-дождевых облаков и связанных с ними опасных природных явлений по крупным физико-географическим областям, таким как европейская часть Российской Федерации, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток.

Экспериментальные работы по тушению лесных пожаров искусственно вызванными осадками

Для принятия решения о проведении работ по искусственному вызыванию осадков необходимо иметь полное представление о состоянии пожароопасности леса, фактическом состоянии погоды в предполагаемом районе работ, а также о возможности ее изменения в ближайшие сутки. Распознавание и прогнозирование лесных пожаров осуществляют на базе ГИС-технологий, разрабатываемых в ГМЦ РФ и уточняемых в ряде регионов с учетом местных особенностей.

Первые опыты по искусственному вызыванию осадков из мощных кучевых облаков в целях тушения лесных пожаров были проведены в 1966–1969 гг. ЛенНИИЛХ совместно с ГГО им. А.И. Воейкова. Для воздействия на конвективные облака использовался йодистый свинец (PbI_2) и йодистое серебро (AgI) при температуре облака не выше минус 6 °С. Выпадение осадков из конвективных облаков мощностью 2000–2500 м наблюдалось через 8–12 мин после их обработки. Из 15 опытов, проведенных в Ленинградской области, положительные результаты были получены в 12, причем в 8 опытах осадки наблюдались от 15 до 40 мин на площади до 12 км^2.

В течение 1968–1969 гг. производилась опытная проверка метода тушения лесных пожаров искусственными осадками над территориями Сибири и Дальнего Востока. Исследования проводились в период с июня по июль на самолетах-зондировщиках и специально оборудованном для воздействий на облака самолете-метеолаборатории Ил-14 под руководством Ю.П. Сумина [12]. За два летних сезона было проведено 20 опытов, потушены пожары на площади около 12 тыс. га, в девяти опытах удалось добиться локализации пожаров, в шести опытах осадки выпали за пределами пожаров. Одной из основных причин непопадания искусственных осадков на пожар являлось отсутствие в намеченной зоне воздействия достаточно развитых по вертикали *Cu cong*. В таких случаях воздействия велись

на любые близко расположенные мощные кучевые облака в целях профилактического смачивания окружающих пожар районов.

Минлесхозом в 1970 г. при Центральной базе авиационной охраны лесов была создана специальная авиагруппа с четырьмя опытно-производственными авиазвеньями в Красноярском и Хабаровском краях, Иркутской области и Якутии. В состав звена входили экипаж самолета-зондировщика (Ли-2 или Ил-14), летчик-наблюдатель и бортаэролог. В 1970–1971 гг. этими звеньями путем искусственного вызывания осадков из мощных конвективных облаков был потушен 71 крупный лесной пожар на общей площади 120 тыс. га, искусственные осадки были вызваны на 136 пожаров. Большинство пожаров было потушено за 7–8 дней до выпадения естественных осадков, что позволило сократить срок действия пожаров и сохранить большую часть лесов от уничтожения огнем. Условный экономический эффект за счет сбереженной древесины и сохранения сырьевых баз лесозаготовительных предприятий за два сезона опытно-производственных работ составил 3,6 млн руб. в ценах того времени [1].

С 1972 г. способ тушения лесных пожаров искусственно вызванными осадками был внедрен на территории Красноярского края, Якутии и Иркутской области, несколько позже – на территории Забайкалья, Тюменской области и северных районов европейской части России. Для проведения работ была разработана и утверждена специальная инструкция [9, 10].

В 1977–1980 гг. с применением самолетных аэрозольных генераторов (САГ) были выполнены эксперименты по воздействию на мощные конвективные облака с самолета Ан-2. В этот же период под руководством Н.С. Шишкина произведено обоснование целесообразности разработки пиротехнических самолетных генераторов кристаллизующих реагентов в целях инициирования осадков из конвективных облаков для тушения лесных пожаров с применением легкомоторных самолетов типа Ан-2 [9, 10]. Для проведения работ началась разработка кассетного устройства и его летные испытания. Выполненные в 1978 г. опыты по воздействию на конвективные облака с применением САГ-2 полностью подтвердили высокую вероятность искусственного вызывания осадков из мощных конвективных облаков с переохлажденной вершиной. Результаты показали, что выбранный способ засева обеспечивает достаточно высокую вероятность стимулирования осадкообразования: 70–80 % засеянных облаков через 16–20 мин после введения реагента под облаком переходят в кучево-дождевые с выпадением осадков. Однако эти исследования не дали убедительного ответа на важный вопрос о том, в какой мере полученный результат является следствием воздействия, а в какой мере – естественного процесса. Выполненная оценка эффективности воздействия путем сравнения статистических данных о повторяемости случаев выпадения осадков из облаков, подвергнутых воздействию, и из облаков, развивающихся естественно, показала, что засеянные облака чаще переходят в дождевые, чем незасеянные.

В конце 80-х гг. прошлого столетия научно-исследовательские и конструкторские разработки, начатые Н.С. Шишкиным, завершились созданием технического устройства (КУСАГ-П) и технологии применения самолета Ан-2, оборудованного им для искусственного вызывания осадков из мощных кучевых облаков над очагами пожаров [9, 10]. В работах принимали участие Краснодарский филиал

ГосНИИГА, ГГО им. А.И. Воейкова, ЛенНИИЛХ, производственное объединение «Авиалесоохрана», НИИПХ.

В период с 10 по 28 июля 1989 г. на территории Енисейского авиаотряда Красноярской базы авиационной охраны лесов от пожаров на самолете Ан-2 были произведены опытно-производственные работы по тушению лесных пожаров. За период проведения работ было подвергнуто воздействиям 14 облачных образований. В качестве объекта для воздействия выбирались мощные кучевые облака и облачные гряды с нижней границей 1100–1900 м. Вертикальная мощность облаков, подвергшихся воздействию, отмечалась от 2,2 до 4,8 км, причем при воздействии на облака мощностью менее 2,2 км осадки после введения реагента не наблюдались.

Горизонтальные размеры облаков колебались от 2 × 3 км до 4,5 × 5,0 км; протяженность гряд облаков составляла от 10 до 15 км. Воздействия проводились в соответствии с технологией, которая включала в себя: выбор облаков, пригодных для воздействия; выбор наземной мишени (очага пожара) и рубежа воздействия; проведение воздействий в целях искусственного вызывания осадков на очаг пожара. Воздействия осуществлялись под нижней границей облачности на расстоянии 100 м от нее, на скорости полета самолета 150–180 км/ч путем приведения в действие аэрозольных генераторов в зоне восходящего потока под облаком.

В результате воздействий в 5 случаях были вызваны осадки на очаги пожаров, в 4 случаях осадки прошли мимо очагов пожаров, в 3 случаях осадки не наблюдались, и в 2 случаях искусственные осадки не удалось идентифицировать на фоне естественных, хотя и те и другие попали на очаги пожаров.

Проведенные работы показали, что применяемая технология искусственного вызывания осадков с легкомоторного самолета типа Ан-2 достаточно эффективна, однако кассетное устройство (КУСАГ-П), устанавливаемое под плоскостями самолета, увеличивает расход горючего до 20 %, что снижает продолжительность полета самолета.

Одновременно с этим в процессе работ выяснилось, что кучевые облака мощностью 2,0–2,5 км зачастую располагаются в области положительных температур до нулевой изотермы. В связи с этим в начале 1990-х гг. начались разработки нового реагента [9, 10], который имел бы преимущества прежних автономных генераторов, но был свободен от таких недостатков, как температурный порог применения. С 1991 г. тушение лесных пожаров производится по доработанной технологии с учетом облачных ресурсов и с применением пиротехнических составов как с йодистым серебром, так и с новым реагентом, получившим название «ионогенный аэрозоль» (ПВ-26 ФХС), изготавливаемым в макетах пиропатронов ПВ-26.

Разработанная в ФГБУ «ГГО» в настоящее время технология [8, 11] по искусственному вызыванию осадков при борьбе с лесными пожарами с борта воздушных судов гражданской авиации соответствует современным требованиям авиационной охраны лесов. Технология позволяет производить производственные работы по оперативному увеличению осадков применительно к особенностям ее использования для нужд лесного хозяйства при тушении лесных и торфяных пожаров и проведению профилактических работ по снижению класса пожарной опасности лесов. Применение ионогенных реагентов позволило расширить температурный диапазон проведения работ по искусственному вызыванию осадков,

так как появилась возможность проводить работы по искусственному вызыванию осадков из «теплых» облаков, то есть из облаков, расположенных в диапазоне положительных температур.

Для практики тушения лесных пожаров искусственными осадками важно установить те критерии, которые определяют вероятность выпадения осадков после засева облака реагентом. Как показали исследования, одним из таких критериев является вертикальная мощность облака. Было установлено, что чем больше вертикальная мощность облака, тем вероятнее успех вызывания осадков и их интенсивность. При $\Delta H \sim 1700...2000$ м осадки бывают слабые и непродолжительные. При воздействии на облака с $\Delta H = 2500...3500$ м в 20 % случаев выпадают ливневые осадки, в 55 % – умеренные, в остальных случаях – слабые. Облака с $\Delta H > 3500$ м дают при засеве, как правило, ливневые осадки. По продолжительности искусственные осадки резко отличаются: от нескольких минут (очень сильный ливневый дождь) до нескольких часов (умеренные осадки на большой площади) [8, 11].

Искусственное вызывание осадков из мощных конвективных облаков водным аэрозолем

Эксперименты по засеву облаков каплями воды проводились в ряде стран [9, 10].

Развивающиеся конвективные теплые облака представляют собой коллоидальную устойчивую систему при конвективной неустойчивости атмосферы, в которой небольшим импульсом в естественное развитие облака можно вызвать осадки. Процесс перехода мощных конвективных облаков из состояния коллоидно-устойчивых систем в коллоидно-неустойчивые может происходить естественным путем или искусственно вызванным. Для теплых конвективных облаков, чтобы вызвать осадки, необходимо стимулировать рост облачных капель до размера выпадающих осадков. Самый простой метод укрупнения спектра размеров капель теплого конвективного облака заключается во введении в него капель воды или гигроскопических частиц, так как льдообразующие реагенты в данном случае бесполезны. Оптимальный размер вводимых капель с нижней границы облака зависит от скорости вертикальных движений и мощности облака. Наиболее подходящими считались капли радиусом 30 мкм. Такие капли при вертикальной скорости 3 м/с и мощности облака 3–4 км возвратятся на исходный уровень, имея радиус порядка 2 мм, то есть увеличение массы составит $2{,}5 \cdot 105$ раз.

В процессе существования облака выделяют три этапа: образование, стабилизацию и диссипацию облака в результате естественного испарения облачных частиц. Из этого следует, что при интенсификации первого процесса происходит выпадение осадков, а при стимулировании второго – распад облака. Для решения задачи ИВО рассмотрим ряд вопросов, связанных с естественной эволюцией конвективного облака.

К активным методам следует отнести инициирование баллоэлектрического эффекта, который возникает в результате электризации капель при разбрызгивании в результате гравитационного падения в облаке. Впервые электризация жидкости при дроблении капель была замечена у водопадов Швейцарии в 1786 г. В 1913 г. явление получило название баллоэлектрического эффекта. Наиболее значительный

эффект электризации воздуха наблюдается у самых больших водопадов мира — у водопада Игуассу на границе Бразилии и Аргентины и у водопада Виктория на реке Замбези в Африке [9, 10]. У водопада Виктория за счет дробления воды возникает электрическое поле напряженностью до 25 кВ/м. С удалением от водосброса это поле уменьшается, и на расстоянии около 1,6 км по горизонтали и 0,5 км по вертикали электрическое поле водопада переходит в нормальное электрическое поле земной поверхности. При дроблении пресной воды в воздухе у водопадов количество отрицательных ионов превышает количество положительных.

Наибольшая электризация воздуха наблюдается при разбрызгивании чистой воды. С увеличением концентрации примесей электризация уменьшается и далее меняет знак (в естественных условиях, например у берегов морей и над морской поверхностью). Для капли диаметром 4,4 мм при скорости падения 6,8 м/с высвобождается заряд $0{,}89 \cdot 10^{-12}$ Кл/см^3, в то время как для капли диаметром 0,4 мм при скорости падения 4 м/сек отдача заряда составляет 10^{-12} Кл/см^3. При наибольшей интенсивности разбрызгивания наблюдается выход заряда порядка 10^{-10} Кл на каплю [9, 10]. Измерения зарядов облачных капель показали, что они имеют как отрицательные, так и положительные заряды.

Баллоэлектрический эффект наблюдается только у дипольных жидкостей. Основной причиной эффекта является наличие на поверхности жидкости слоя ориентированных диполей, которые создают двойной электрический слой. Электрическое поле диполей простирается на некоторую глубину внутрь жидкости и концентрирует вблизи ее границ свободные заряды.

Теория электризации при разбрызгивании капель разрабатывалась Дж. Мейсоном [9, 10] и др. исследователями. Неустойчивый размер капли наступает при радиусе ≥2,5 мм. Наблюдения показывают, что капли радиусом более 2,5–3,2 мм в облаках не встречаются – они сплющиваются и разрушаются, образуя большое число более мелких капель. В лабораторных опытах капли диаметром более 5 мм разбрызгиваются за очень малый промежуток времени. Для капель радиусом 4,25–6,25 мм, падающих в спокойном воздухе, число брызг, по лабораторным измерениям, колеблется от 3 до 97 (в среднем 30–40). При разбрызгивании образуются несколько капель радиусом около 1 мм и относительно большое число мелких капель. Крупные капли выпадают в виде дождя или ливня, а мелкие – поднимаются в восходящем потоке к вершине облака, укрупняясь до критических размеров в результате электрокоагуляции. Такая цепная реакция может происходить от 3 до 6 раз с постепенным затуханием по мере вымывания водности из облака. Этот процесс происходит по времени до 30 мин.

Для реализации баллоэлектрического способа искусственного регулирования осадков предложены способ и устройство [10]. Изобретение относится к активным воздействиям на метеорологические процессы в целях искусственного регулирования осадков путем распыления водного аэрозоля с воздушных судов. Искусственное вызывание осадков осуществляется с использованием воздушного судна (Ил-76, Бе-200, Як-42, Ан-32, Ан-26, Ми-8, Ми-26 и др.) с аппаратурой для измерения метеорологических величин (температуры, характеристик влажности, скорости вертикальных движений, фазового состояния облака, микроструктуры облака, радиолокационной отражаемости облаков и др.), баками с водой (ВСУ-5 и др.),

форсунками для распыления воды («Турботак» и др.), бортовым вычислительным устройством (бортовая ЭВМ), управляющим устройством (контроллер и др.), соединенными каналами бортовой связи и каналами связи с наземным пунктом управления, совмещенным с метеорологической радиолокационной станцией (автоматизированная МРЛ-5, ДМРЛ и др.).

Распыление жидкости на самолетах и вертолетах производится под давлением с помощью струйных форсунок, к которым подводится распыляемая жидкость. Значительное влияние на качество распыления оказывают метеорологические факторы, основными из которых являются: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра и состояние атмосферы (наличие или отсутствие вертикальных движений воздуха). При наличии современных самолетов-танкеров типа Бе-200п и др., снабженных струйными форсунками, при необходимости распыление из одного галлона воды (3,785 л) составляет свыше 7 трлн ($7{,}2 \cdot 10^{12}$) капель одного радиуса.

Наряду с тушением лесных пожаров искусственно вызванными осадками из конвективных облаков, для профилактики их возникновения эффективным и перспективным методом может считаться метод, заключающийся в создании искусственных перистых кристаллических облаков (ИПКО) [4, 5]. Суть этого метода состоит в диспергировании кристаллизующих реагентов (например, йодистого серебра) в слоях атмосферы с пересыщением водяного пара надо льдом при низких отрицательных значениях температуры воздуха (ниже –30 °С) на высотах 8–12 км (чаще всего под слоем тропопаузы). Частицы кристаллизующего реагента адсорбируют водяной пар из атмосферы, увеличиваясь в размерах до облачных ледяных кристаллов перистых облаков, и диффундируют за счет турбулентности, образуя вначале облачные полосы, а после их слияния – ИПКО.

Основное преимущество данного метода заключается в том, что при создании ИПКО главным «строительным материалом» оказываются не диспергируемые частицы реагента, а водяной пар атмосферы. Масса водяного пара, осаждающегося на частицах реагента, в 10^4–10^5 раз превышает массу исходного распыленного вещества. При создании ИПКО спектр размеров диспергируемых частиц может быть смещен в сторону мелких частиц (диаметром 0,1–0,01 мкм и менее). В результате этого выход льдообразующих частиц с единицы массы реагента составляет 10^{12}–10^{14} $г^{-1}$ (в зависимости от применяемого пиротехнического состава, типа генератора аэрозолей, способа диспергирования, температурно-влажностных характеристик атмосферы и т. д.) [4].

Наличие полей ИПКО в течение длительного времени (часы – десятки часов) и на больших площадях (100 × 100, 200 × 200 км) приводит к значительным изменениям температурного режима у поверхности земли. Расчеты показывают, что в этом случае понижение температуры воздуха у поверхности земли может составить 5–7 °С, что, в свою очередь, исключает возможность возникновения кучево-дождевых облаков, являющихся источниками молний [7].

Следует отметить, что применяемые в настоящее время химические реагенты и их рецептуры не могут оказать сколь-нибудь значимого негативного влияния на состояние экологической обстановки в районах проведения работ по воздействию на облака и атмосферу и за их пределами, что наглядно показано проведенными исследованиями ряда авторов [7].

Физическая и экономическая оценка эффекта искусственного вызывания осадков

Экспериментальные ионогенные реагенты [9, 10] использовались ФГУ «Авиалесоохрана» для тушения лесных пожаров и снижения класса пожарной опасности лесов (КПО) в 1997–2006 гг. Результаты этих работ приведены ниже в таблице, в которой изложены обобщенные оценки за 2000–2006 гг. искусственных воздействий на лесные территории.

Обобщенные оценки искусственного вызывания осадков в засушливый период на лесные территории РФ за 2000–2006 гг.

Год	Площадь погашенных пожаров, га	Количество полностью погашенных пожаров	Количество использованных пиропатронов с калиево-магниевым составом ПВ-26 ФХС	Количествово искусственно вызванных осадков, т	Потенциальный экономический эффект, млн долл. США	Количество воздействий с выпадением осадков (числитель) и без выпадения (знаменатель)	Количество частично погашенных пожаров, на которые выпали осадки
2000	16 693	49	459	1 836 230	417,3	189/21	104
2001	945	8	159	103 950	23,62	43/16	16
2002	6570	22	479	722 700	164,25	80/31	40
2003	74 496	71	692	8 194 560	1862,4	139/37	112
2004	13 379	13	179	1 471 690	334,5	60/2	18
2005	2215	9	86	243 650	55,45	11/5	11
2006	19 030	30	366	2 093 300	475,7	129/9	42

Всего за 2000–2006 гг. ионогенными реагентами было произведено 772 воздействия на мощные кучевые облака для тушения лесных пожаров и снижения КПО лесов. Из них в 651 случае выпадали осадки (~84 %), не выпадали осадки в 121 случае (16 %); количество пожаров, на которые выпали осадки, – 545 (~85 %), из них полностью погашено пожаров – 202 (~37 %), 106 воздействий проводилось для снижения КПО лесов; использовано 2420 пиропатрона ПВ-26 ФХС. Зоны выпадения искусственно вызванных осадков соответствуют зонам выпадения естественных осадков и имеют форму эллипса или овала, вытянутых вдоль направления ветра. Длина зоны осадков из одного облака колеблется от 3 до 30 км (в 70 % случаев от 4 до 14 км), ширина – от 2 до 18 км (в 70 % случаев – от 2,5 до 5 км). Площадь искусственно вызванных осадков одним изделием ПВ-26 ФХС изменялась от 30 до 80 га в зависимости от влагосодержания атмосферы, энергии неустойчивости и других факторов. Средний объем конвективного облака мощностью от 2,5 до 3 км составляет от 9 до 10 км^3. В процессе роста мощность облака может увеличиться в 2–3 раза. При средней водности облака, равной 1 г/м^3 (изменяется от 0,01 до 8 г/м^3), из него может быть получено от 9 до 10 тыс. т воды, а с учетом коэффициента регенерации (около 4,2) этот объем увеличивается до 37–42 тыс. т.

Применение методов ИВО в течение всего календарного года для создания запасов влаги в почве путем увеличения выпадения снега зимой и дождей в теплый период года может существенно сократить дефицит влаги. Наиболее эффективными для этих целей являются реагенты, зарекомендовавшие себя при тушении лесных пожаров [9, 10]. В результате усовершенствования реагента на основе накопленного опыта ИВО был разработан и запатентован универсальный пиротехнический состав [9, 10] для искусственного воздействия на различные виды конвективной облачности.

Заключение

Рассмотрен экологический и социальный ущерб от лесных пожаров. Лесные пожары оказывают влияние и на региональную погоду и потепление климата. Одним из методов борьбы с лесными пожарами является искусственное вызывание осадков. Анализ результатов выполненных к настоящему времени экспериментальных работ по ИВО на лесные территории для снижения КПО лесов и тушения лесных пожаров позволяет сделать вывод о том, что при определенных условиях искусственного воздействия происходит изменение микроструктуры засеянных облаков, выпадение осадков, снижение КПО, тушение лесных пожаров.

Литература

1. *Арцыбашев Е.С.* Тушение лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1973. – 88 с.
2. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы. – М.: Дэкс-Пресс, 2004. – 312 с.
3. *Гусев В.Г., Ирицян В.А., Ирицян Е.В.* Прогнозирование параметров лесных пожаров и ресурсов для борьбы с ними. – СПб.: СПбНИИЛХ, 2011. – 218 с.
4. *Доронин А.П., Подгайский В.Н., Макаров А.В.* Предотвращение лесных пожаров путем создания искусственной облачности // Мониторинг. 1995. № 2. – С. 44–45.
5. *Возможности* и пути создания полей искусственных облаков / В.А. Зайцев, Б.П. Кудрявцев, А.А. Ледохович // Метеорология и гидрология. 1977. № 7. – С. 3–9.
6. *Иванов В.А., Иванова Г.А.* Пожары от гроз в лесах Сибири. – Новосибирск: Наука, 2010. – 166 с.
7. *Экологические* аспекты российских технологий активных воздействий на облака / Н.С. Ким, В.П. Корнеев, А.В. Частухин, Г.Г. Щукин // Учен. зап. РГГМУ. 2017. № 46. – С. 91–99.
8. *РД 52.04.674–2006.* Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров / В.Н. Козлов, Е.С. Арцыбашев, Д.Р. Айсин и др. – М.: Метеоагенство Росгидромета, 2006. – 118 с.
9. *Козлов В.Н.* Методы искусственного вызывания осадков для борьбы с лесными пожарами. – СПб.: Изд. Инфо-да, 2011. – 202 с.
10. *Козлов В.Н., Емельянова Н.А., Коршун Н.А.* Искусственное регулирование осадков. – Saarbrucken Deutschland. Изд.: LFP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 372 с.
11. *Козлов В.Н., Клинго В.В., Лихачев А.В. и др.* РД 52.04.628-2001. Инструкция. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 24 с.
12. *Сумин Ю.П.* Об опытах по тушению (локализации) лесных пожаров путем искусственного воздействия на облака // Тр. ГГО. 1971. Вып. 262. – С. 54–69.
13. *Заключение* Общественной комиссии по расследованию причин и последствий природных пожаров в России в 2010 году [Электронный ресурс]. URL: http://www.yabloko.ru/mneniya_i_publikatsii/2010/09/14 (дата обращения 05.03.2011).

УДК 551.577.38:504.4

В.Ю. Пасечкина, М.Н. Истомина, С.Г. Добровольский

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ЗАСУХИ МИРА И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ ВО ВРЕМЕНИ: ПРИРОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УЩЕРБОВ

ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», sgdo@bk.ru

V.Yu. Pasechkina, M.N. Istomina, S.G. Dobrovolski

WORLD AGRICULTURAL DROUGHTS AND THEIR TIME EVOLUTION: NATURAL PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF SOCIAL-ECONOMIC DAMAGES

Анализируются, в глобальном масштабе, количественная информация о крупнейших «сельскохозяйственных» засухах и изменения их параметров во времени: географического положения районов засух, дат начала и длительности засух, материальных (финансовых) и гуманитарных (социальных) ущербов. Регистрируется формальное увеличение числа засух и ущербов от них на протяжении последних десятилетий. В то же время относительные параметры засух, в первую очередь приведенные к среднему на одну засуху – как природные параметры, так и характеристики ущербов – не обнаруживают статистически значимого роста за последние 40 лет, то есть за период наиболее интенсивного роста концентрации парниковых газов в атмосфере и глобальной температуры.

Ключевые слова: *сельскохозяйственные засухи, природные параметры засух, характеристики социально-экономических ущербов.*

Quantitative information about the strongest «agricultural» droughts, as well as time variations of those parameters, are analyzed in global scale: geographical locations of drought areas, dates of beginning and durations of droughts, material (financial) damages and humanitarian (social) losses. It is noted that formal increase of frequencies of droughts and their damages are registered during the recent decades. At the same time, the average values of different parameters per one drought – both natural parameters and damage characteristics – did not reveal statistically significant increase over the past 40 years – that is period of the most intensive rise of the greenhouse gases in the atmosphere and of global temperature.

Keywords*: agricultural droughts, natural parameters of droughts, characteristics of social-economic damages.*

Введение. Понятие «засуха»

Засухи, наряду с другими экстремальными явлениями естественного происхождения (наводнениями, землетрясениями, извержениями вулканов, штормами), относятся к числу наиболее опасных для человека явлений. Так, по нашим оценкам, с 1980 по 2016 г. число людей, пострадавших от крупных засух во всем мире, превысило 1,5 млрд человек, а общие финансовые ущербы от крупных засух оценивались суммой порядка 800 млрд долл.

В целом засухам и маловодьям посвящено сравнительно большое количество научных работ. Можно в этой связи упомянуть объемистые труды представительной

международной конференции «Экстремальные гидрологические события…» [14], издание «Экстремальные гидрологические ситуации» [13], работы [15, 19, 20–24] и др. Однако в основном перечисленные и другие работы посвящены засухам и маловодьям в пределах отдельных регионов и речных бассейнов. Вместе с тем представляется, что в глобальном масштабе (в особенности в такой части мира, как развивающиеся страны) засухи изучены недостаточно.

Прежде всего, отличается неопределенностью сам термин «засуха». Существуют по крайней мере четыре его толкования: «сельскохозяйственная засуха» (связанная с уменьшением или гибелью урожая, с потерями домашних животных); «метеорологическая засуха» – уменьшение увлажненности поверхности суши, оцениваемое по метеорологическим параметрам; «гидрологическая засуха» (логически пересекающаяся с понятием «маловодье») – уменьшение водности рек, озер и других гидрологических объектов. Однако в большинстве случаев и в имеющихся базах данных о засухах, и в литературе используют, скорее, интуитивное понятие «засуха», фактически совмещающее в себе все три предыдущих варианта, но все-таки находящееся ближе к понятию «сельскохозяйственная засуха».

Уже сама множественность понятий «засуха» говорит о том, что нет четких критериев того, какое уменьшение увлажненности поверхности суши можно причислять к засухам. Целесообразно, на наш взгляд, использовать здесь опыт изучения «противоположных» (кстати, несколько лучше изученных) экстремальных явлений – наводнений [1, 2, 8–10, 22]. Так же, как в случае с наводнениями (временными затоплениями освоенных человеком территорий, вызывающими отрицательные последствия социального и/или экономического характера), засухи имеет смысл рассматривать не столько как естественное явление, сколько как комплексное природно-социальное явление. Иными словами, уточнением интуитивного понятия «засуха», на наш взгляд, может быть следующее описание этого явления: «*временное уменьшение увлажненности, приводящее к социально-экономическим ущербам*». При этом под социально-экономическими ущербами естественно понимать повреждение или уничтожение материальных объектов, соответствующие финансовые ущербы, но в особенности – социальные и гуманитарные ущербы, выражающиеся в вынужденном переселении людей, в сопутствующих психологических травмах, а также в вызванных недоеданием и недостаточностью качественной питьевой воды болезнях и смертях людей.

Нетрудно заметить, что и в такой трактовке, хотя и сужающей понятие «засуха» и делающей его несколько более четким, точная идентификация явления и точная оценка ущербов от него крайне затруднены. В развивающихся странах гуманитарные ущербы от засух зачастую трудно отделить от ущербов вследствие других событий: общего упадка экономики, военных действий, политических событий, миграций населения, антисанитарного состояния поселений, эпидемий и т. д.

Изучение засух чрезвычайно затруднено вследствие крайне недостаточной информации о явлении. Мы попытались осуществить комплексный подход к получению и анализу информации о засухах, заключающийся в анализе наиболее полных архивов соответствующих данных. Так, для анализа засух в интуитивном (скорее, «сельскохозяйственном») понимании явления мы использовали архив крупнейших засух Лувенского университета [21], по возможности дополнив его. Отметим, что

отдельно изучались данные по «метеорологическим засухам» [16] и «гидрологическим засухам» и маловодьям (по данным наблюдений за речным стоком использовался созданный нами архив данных по минимальному стоку, описанный в [5, 6]).

В заключение вводной части отметим, что для авторов основной интерес представлял вопрос о динамике засух, то есть об изменениях количественных параметров засух на протяжении последних лет и десятилетий. Методы анализа закономерностей изменчивости параметров во времени подробно описаны в [5, 6, 17, 18]. Во многих публикациях, как в научной, так и в научно-популярной литературе, и в СМИ в последние годы часто фигурирует мнение об увеличении количества и ущербов от таких явлений, как засухи и наводнения, причем причина этого роста зачастую видится в глобальном парниковом эффекте и увеличении вследствие этого глобальной температуры воздуха. Одной из основных задач настоящего исследования была проверка на основе количественных данных этого предположения.

Другими задачами, связанными с первой, но имеющими и самостоятельное значение, являются: подробный анализ вероятностных свойств каждого из доступных параметров засух, построение стохастических моделей временных рядов этих параметров, выявление взаимосвязей между различными параметрами засух как «естественными», так и параметрами социально-экономических ущербов.

Заметим, что в данной работе мы не касались такой также чрезвычайно дискуссионной проблемы, как опустынивание. Временные масштабы опустынивания, скорее всего, превышают те масштабы времени, которые исследуются в настоящей работе, а сам процесс опустынивания нуждается в использовании в большей степени биогеографических и биолого-почвенных методов. Заметим также, что формальное отличие опустынивания от засух и маловодий заключается в постоянном, а не во временном кардинальном уменьшении увлажненности.

Исходная информация

Для достижения поставленных в работе целей в лаборатории глобальной гидрологии ИВП РАН создана (постоянно совершенствующаяся) электронная база данных по засухам мира. Для ее наполнения были использованы все доступные источники информации: научная литература, данные Интернета, информация СМИ, база данных Лувенского католического университета (Бельгия) [21], личная база данных [5] и др. Конечный вид базы данных – иерархический набор электронных таблиц в формате Statistica 6-1 [26], позволяющих использование программной среды «Статсофт» и других прикладных программ, в основном разработанных авторами статьи.

В общей сложности в базу данных вошла информация более чем по 2400 локациям засух за период 1900–2016 гг., в принципе соответствующих приведенному выше определению (см. карту на рис. 1).

В базе данных, кроме буквенных переменных, фиксировались следующие числовые параметры:

- широта и долгота центров районов (локаций) засух;
- время начала и завершения засухи (в месяцах и годах);
- материальный – финансовый – ущерб от засухи в сопоставимых денежных единицах с учетом инфляции;

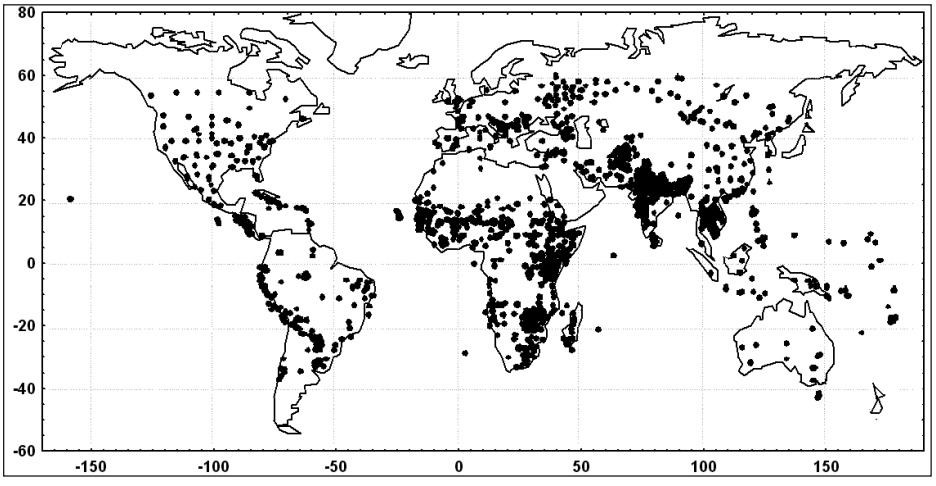

Рис. 1. Географическое положение центров локаций засух, 1900–2016 гг.

- общее число пострадавших от засухи людей;
- число погибших.

В общей сложности был охвачен период с конца XIX в. до первых месяцев 2016 г., однако наиболее подробная информация имеется за последние примерно 40 лет: с середины 1970-х годов до 2015 г. включительно. При этом не для каждого района засухи (локации) имелся полный набор параметров.

В качестве буквенных параметров в базе данных имеется информация о названиях географических пунктов (населенных пунктов или местностей), в которых наблюдалось явление, названия соответствующих стран, сведения об экономико-демографической ситуации в соответствующей стране (численность населения, ВВП и др.).

Как показывает картосхема на рис. 1, явления засух встречались в поясе от примерно 40º ю. ш. до приблизительно 60º с. ш. Более подробный анализ географического положения регионов засух будет дан в одном из последующих разделов.

Для анализа закономерностей изменений параметров засух и характеристик ущербов от засух использовались методы, описанные в работах [5, 6, 25, 27].

Природные параметры засух

Географическое положение районов засух

Как указывалось, расположение центров районов засух (локализаций) показано на рис. 1. Карта на этом рисунке показывает, что пространственное распределение засух крайне неравномерно. Регионы наиболее частых засух: полуостров Индостан, часть территории Пакистана и примыкающей территории Афганистана в Евразии, зона Сахели, восточная и юго-восточная части Африки. Засухи почти не фиксировались для бассейнов Амазонки и Конго, а также для регионов Сахары, пустынь Аравийского полуострова и Центральной Азии. Наконец, отсутствовали упоминания о засухах севернее примерно 60º с. ш. и южнее примерно 40º ю. ш.

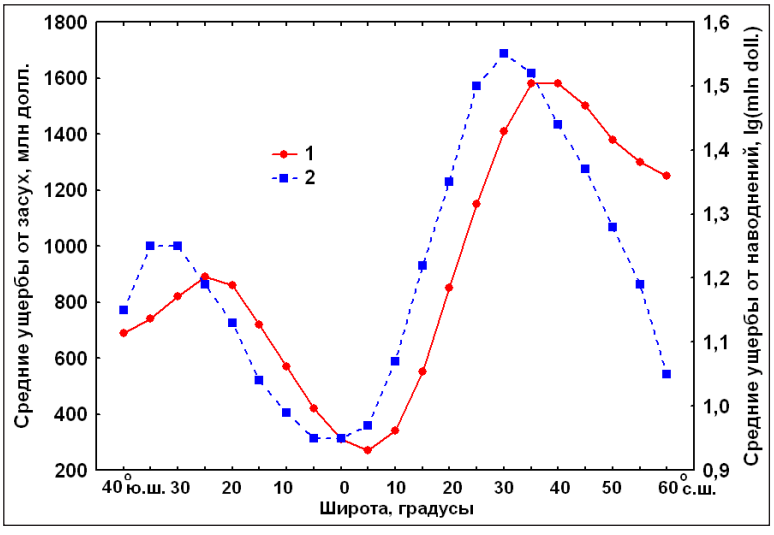

Рис. 2. Изменения по широте средних значений ущербов от засух (*1*) и наводнений (*2*)

Интересно то, что имеется определенное сходство, в глобальном масштабе, пространственного распределения основных регионов засух и наводнений – казалось бы, противоположных друг другу явлений. Действительно, и те, и другие катастрофические явления практически не происходят ни в максимально увлажненных регионах (бассейны Амазонки, Конго и т. п.), ни в наиболее пустынных регионах.

Карта на рис. 1 не дает представления об интенсивности засух. Забегая вперед, представим (рис. 2) широтное распределение средних ущербов от засух за период 1976–2015 гг., лучше освещенный данными. На этом же рисунке помещен график широтного распределения ущербов от наводнений. Как это ни парадоксально, в основных чертах два графика демонстрируют общие черты широтного распределение ущербов (а, значит, и интенсивности) двух типов явлений. А именно: абсолютные минимумы двух кривых приходятся на полосу приэкваториальных широт (между 5º южной и северной широт); максимумы приходятся на полосу 25–35º соответственно северных и южных широт. При этом кривая засух (*1*) незначительно, в глобальном масштабе, смещена относительно кривой наводнений (*2*) на 5–10º к северу, как в Северном, так и в Южном полушарии.

Указанное сходство свидетельствует о том, что оба типа катастрофических явлений имеют не только (может быть, не столько) природные, сколько социально-экономические причины. Действительно: как приэкваториальные, так и субполярные области Земли обладают скудным населением и слабо развитой экономикой. Наоборот, полоса 25–40º в обоих полушариях отличается повышенной плотностью населения.

Изменения во времени координат центров районов засух

В соответствии с распространенным мнением о значительном влиянии глобального потепления на явления засух в принципе основные «пояса засух» должны

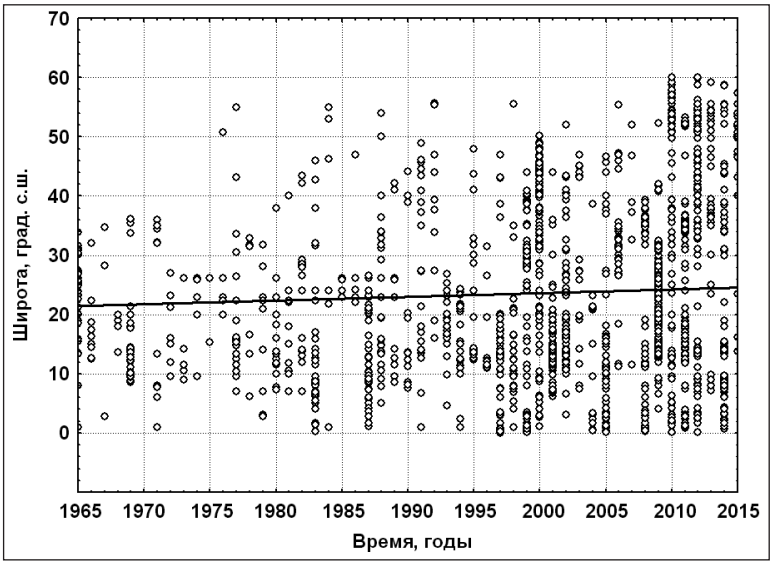

Рис. 3. Изменения во времени широт центров районов засух.
Сплошная прямая линия – линейная аппроксимация
методом пространственно-взвешенных наименьших средних квадратов

были бы с течением времени заметно продвигаться на север в Северном полушарии и на юг в Южном полушарии. Для проверки этого предположения нами были проанализированы изменения во времени широт центров районов засух за последние 40–50 лет, то есть именно за тот период, на протяжении которого наблюдалось значительное увеличение глобальной температуры воздуха, приписываемое большинством исследователей парниковому эффекту.

На рис. 3 показаны изменения во времени широт центров районов засух Северного полушария. Линейная аппроксимация указывает на сравнительно небольшое увеличение средней широты за последние полвека – примерно на 3º. Для того чтобы оценить статистическую значимость этих изменений, нами анализировался методами [3–6] ряд средних годовых широт центров районов наводнений за последние 40 лет – с 1976 по 2015 г. (рис. 4).

Анализ ряда на рис. 4 дает следующие результаты: среднее значение составило за этот период 23,7º с.ш. – значение, близкое к оценке медианы (22,3º); коэффициент коррелированности смежных членов исходного ряда составил крайне незначительную величину – 0,024, аналогичное значение для ряда, пересчитанного в выборочные значения гауссовских случайных величин, равнялось нулю вплоть до третьего знака: 0,00. Соответственно, стохастическая модель ряда была идентифицирована как реализация «гауссовского белого шума» – последовательности некоррелированных по времени случайных величин, другими словами, – процесса авторегрессии нулевого порядка.

Расчеты индексов стационарности ряда на рис. 4 по среднему значению (I_{SM}), по автокоррелированности (I_{SR}) и по стандартам (I_{SS}) показывают, что ряд близок

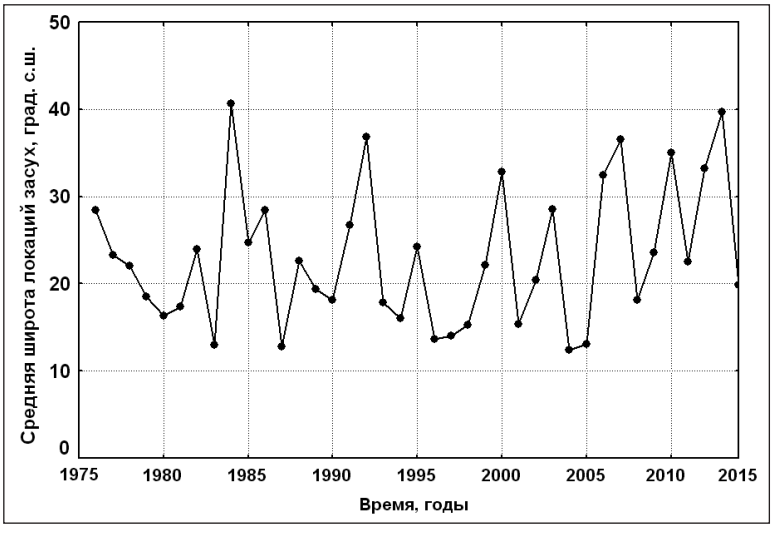

Рис. 4. Изменения во времени среднегодовых значений широт центров районов засух. Северное полушарие

к реализации стационарного случайного процесса. А именно: оценка значения $I_{SM} = +0{,}35$; $I_{SS} = +1{,}23$; $I_{SR} = -1{,}05$. Напомним, что для абсолютно стационарных рядов среднеквадратичное значение каждого из индексов равно, по модулю, единице, и плотность вероятности индексов соответствует нормальному распределению.

На рис. 5 и 6 показаны графики для Южного полушария, аналогичные соответственно графикам на рис. 3 и 4. Значения параметров, рассчитанных для ряда на рис. 6, следующие: среднее – 15,5º ю.ш.; медиана 15,7º ю.ш.; коэффициент корреляции между значениями широты смежных лет исходного ряда –0,064; для ряда, пересчитанного в выборочные значения гауссовской случайной величины, –0,071; порядок процесса авторегрессии в обоих случаях равнялся нулю. Значения индексов стационарности/нестационарности: $I_{SM} = +1{,}63$; $I_{SS} = -0{,}13$; $I_{SR} = +0{,}16$. Видно, что значение индекса стационарности по математическому ожиданию несколько повышено, однако выборочная изменчивость может давать сходную оценку и для стационарного ряда. Интересно, кроме того, что теоретически глобальное потепление должно было бы привести к продвижению средней широты пояса засух в Южном полушарии на юг, в то время как наблюдается (небольшое) продвижение к северу.

Таким образом, теоретически ожидаемого статистически значимого продвижения поясов засух Северного и Южного полушарий по направлению к соответствующим полюсам (за период наиболее интенсивного глобального потепления с середины 1970-х годов) не наблюдается.

Даты начала засух

Существенна информация о датах начала засух и об их динамике. Осредненную для всего периода наблюдений картину для Северного полушария дает гистограмма на рис. 7.

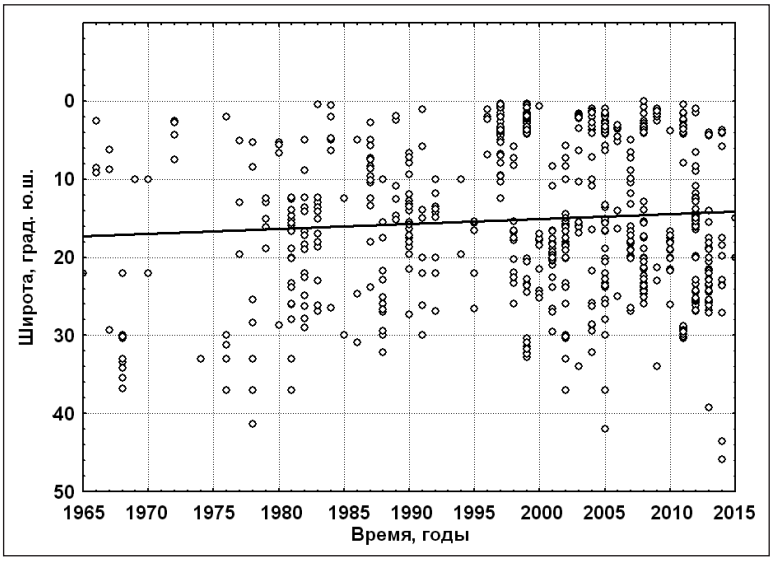

Рис. 5. То же, что рис. 3, но для Южного полушария

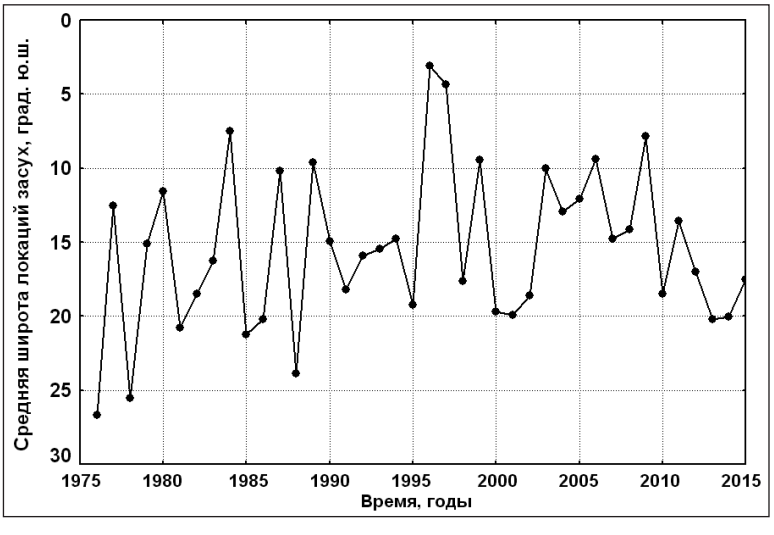

Рис. 6. То же, что рис. 4, но для Южного полушария

Рисунок показывает, что середина лета Северного полушария – июль – с большим опережением преобладает в отношении начала засушливых периодов. Второй по значимости пик наблюдается в середине зимы, в январе. На летний период приходится 41 % случаев начала засух, на зимний – 27 %, на весенний – 21 %, на осенний – всего 11 %.

О динамике дат начала засух Северного полушария дают представления графики на рис. 8 и 9. Рис. 8 демонстрирует некоторое визуально статистически

незначимое увеличение примерно на 2,5 недели месяца начала засух. Заметим, что теоретически можно было бы ожидать обратного эффекта глобального потепления – наступления более ранних засух.

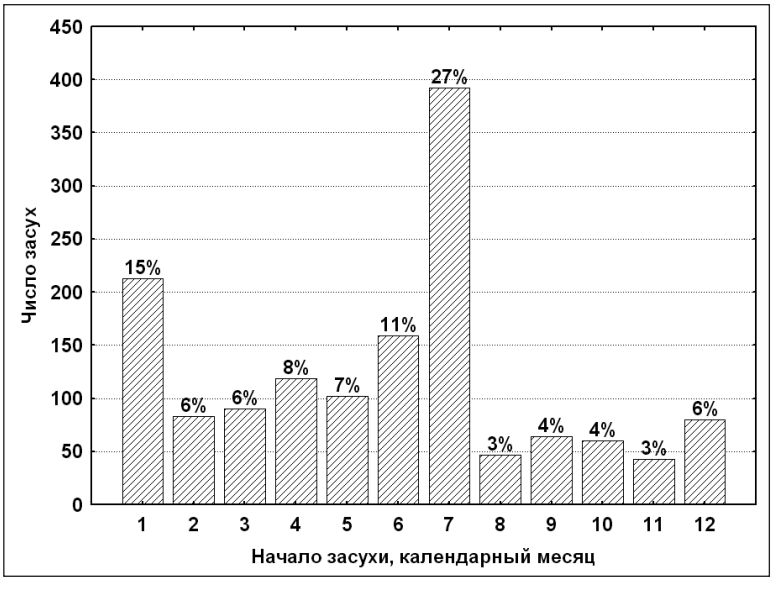

Рис. 7. Гистограмма месяцев начала засух в Северном полушарии

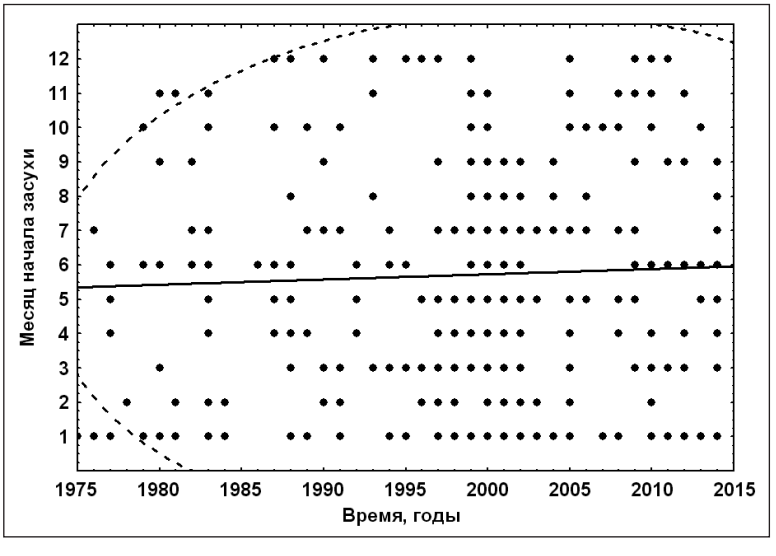

Рис. 8. Изменения во времени месяцев начала засух в Северном полушарии. Прямая линия – аппроксимация методом пространственно-взвешенных наименьших средних квадратов; пунктирная линия – 95%-й эллипс рассеяния

Рис. 9. Изменения во времени осредненных по годам календарных месяцев начала засух в Северном полушарии

Для более точной оценки значимости тренда в месяцах начала засух на рис. 9 представлены месяцы начала засух, осредненные по календарным годам. Анализ ряда на рис. 9 описанными выше методами показывает, что ряд удовлетворяет гипотезе стационарности как по математическому ожиданию, так и по стандартам и автокоррелированности: значение индексов стационарности соответственно $I_{SM} = +1{,}01$; $I_{SS} = -0{,}13$; $I_{SR} = +0{,}21$. Значения других параметров: среднее – 5,4 месяца (совпадает с модой и медианой); коэффициент коррелированности смежных значений исходного ряда +0,17; гауссовского ряда +0,16; порядки моделей авторегрессии в обоих случаях нулевые.

Гистограмма месяцев начала засух в Южном полушарии (рис. 10) в принципе аналогична соответствующей гистограмме для Северного полушария: максимум и в этом случае приходится на середину лета (Южного полушария, то есть на январь). Отличием является то, что не наблюдается четко выраженного вторичного максимума зимой Южного полушария.

Продолжительность засух

Методологические сложности, связанные с оценкой продолжительности засух, обусловлены тем, что обычно начало и окончание этого явления в источниках информации даются в месяцах. Таким образом, неопределенными оказываются продолжительности засух меньше месяца. Учитывая сомнительность такого рода информации, нами принимались во внимание только засухи продолжительностью 1 месяц и более.

С учетом указанной особенности небольших длительностей засух, не имело смысла оценивать гистограммы плотности вероятностей этого параметра в логарифмическом масштабе. На рис. 11 приведена гистограмма продолжительности в их исходном виде, аппроксимированная геометрическим распределением.

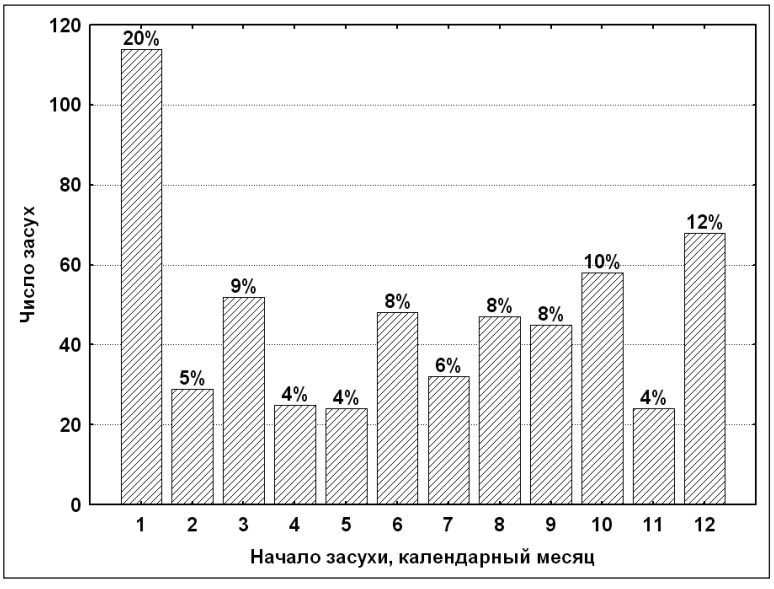

Рис. 10. Гистограмма месяцев начала засух в Южном полушарии

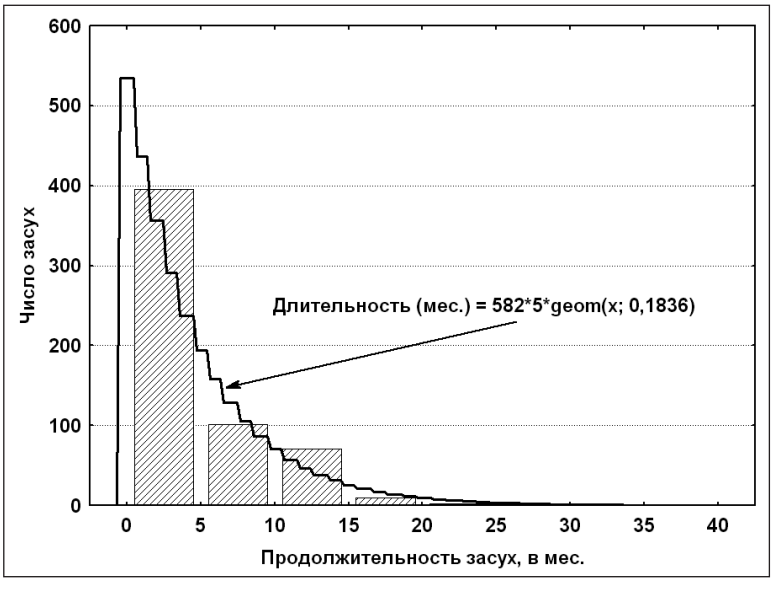

Рис. 11. Гистограмма плотности вероятности продолжительности засух

В целом статистики данных по продолжительности засух, в глобальном представлении, выглядят следующим образом: среднее значение – 4,45 мес. (то есть на полтора порядка больше, чем средняя продолжительность наводнений); стандарт – 4,96 мес.; мода и медиана равны 1 мес.; коэффициент асимметрии – 1,72.

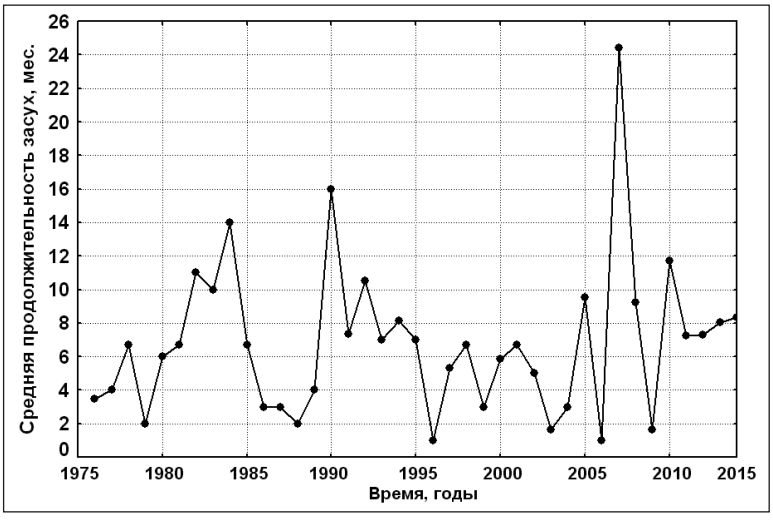

Рис. 12. Изменения во времени осредненных по годам средних значений продолжительности засух

На рис. 12 показаны изменения за период наиболее значительного глобального потепления (1976–2015 гг.) средних значений продолжительности засух. Анализ этого ряда описанными выше методами приводит к следующим результатам.

Коррелированность смежных значений исходного ряда составила –0,009; «гауссовского» варианта ряда + 0,04; порядок авторегрессионных моделей в обоих случаях был равен нулю. Значения индексов стационарности: I_{SM} = –0,83; I_{SS} = +0,95; I_{SR} = –0,11. Изменения длительности засух за последние 40 лет, таким образом, не обнаруживают статистически значимых нестационарностей.

Характеристики социально-экономических ущербов от засух

Задача оценки социально-экономических ущербов от засух еще более сложна, чем аналогичная задача для наводнений. Последствия засух, в особенности в развивающихся странах, трудно отличить от результатов таких явлений, как эпидемии, экономические кризисы, войны, миграции населения и т. д. Тем не менее представляется, что при осреднении данных по большому количеству засух значимые результаты выделяются на фоне ошибок – во всяком случае, приведенные ниже результаты в первом приближении представляются правдоподобными.

Материальные (финансовые) ущербы от засух

Суммарный ущерб от засух за весь период времени, охваченный базой данных (в основном информация была за период 1976–2016 гг.), по нашим оценкам, составил 171 млрд 970 млн долл. США в ценах 2014 г. При этом информация по большому количеству средних и мелких засух отсутствовала, однако наиболее крупные засухи сравнительно полно освещены в базе данных.

Средняя величина ущерба составила 988,3 млн долл., медиана 140 млн долл., Наиболее крупный ущерб от одной засухи зафиксирован для засухи в США

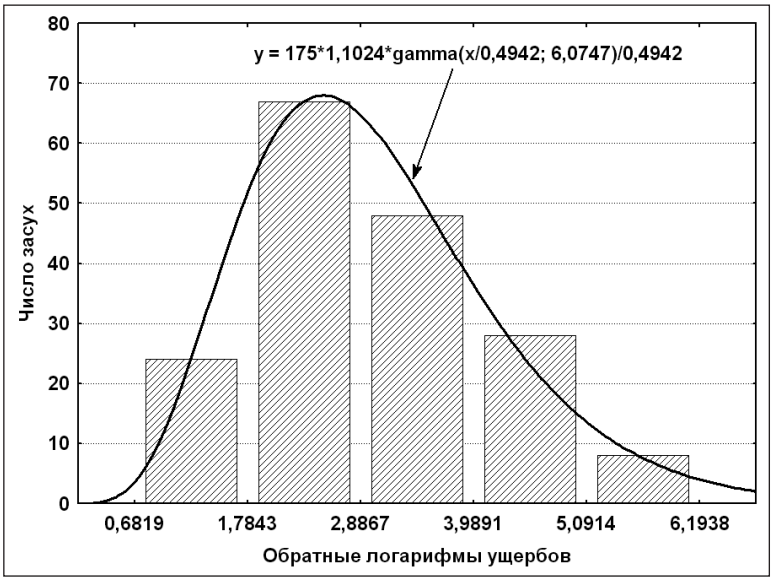

Рис. 13. Гистограмма плотности вероятности ущербов
от наиболее крупных засух мира

в 2012 г. – 20 800 млн долл. Отметим в связи с этим, что вообще суммарные ущербы от засух в развитых странах («Золотого миллиарда») на 20 % превышают ущербы в развивающихся странах.

На рис. 13 показана гистограмма плотности вероятности ущербов от крупнейших засух мира в логарифмической шкале. Наиболее адекватная аналитическая аппроксимация – обратное логарифмическое гамма-распределение с параметрами, фигурирующими на рисунке.

Представляют интерес изменения средних ущербов от засух за последние десятилетия. Соответствующий график помещен на рис. 14. Анализ ряда на рис. 14 при помощи описанных в работах [5, 6] методов дает следующие результаты: выборочная оценка коэффициента коррелированности смежных членов исходного ряда равна 0,074; для ряда, пересчитанного в реализации гауссовского процесса, – 0,095. Оценки порядков процесса авторегрессии, описывающей процесс, в обоих случаях равны нулю. Индексы стационарности полностью соответствуют реализации стационарного процесса: $I_{SM} = –0,96$; $I_{SS} = –0,87$; $I_{SR} = +0,004$. Таким образом, изменения средних ущербов за период, соответствующий наибольшему росту глобальных температур (с середины 1970-х г. до 2015 г.), удовлетворительно описываются реализацией стационарного некоррелированного по времени процесса («белого шума»).

Гуманитарные (социальные) ущербы от засух

Как указывалось выше, социальные (гуманитарные) ущербы от засух поддаются оценке лишь с большим трудом, так как трудно вычленить фактор засухи

Рис. 14. Изменения во времени средних ущербов от засух

от других, зачастую одновременно действующих, факторов, приводящих к гуманитарным катастрофам: эпидемий, массовых миграций, войн и т. п., в первую очередь в слабо развитых странах. Тем не менее оценки гуманитарных ущербов существуют; наиболее часто встречаются оценки общего числа пострадавших от засухи.

По нашим расчетам, общее число пострадавших – в основном за наиболее освещенный информацией период с середины 1970-х г. – 2 240 110 тыс. чел., то есть более трети населения Земли. При этом необходимо учесть, что засухи зачастую повторяются примерно в одних и тех же регионах (Сахель, Индостан, Юго-Восточная Азия, Юго-Восточная Африка и др.), поэтому общее число людей, когда-либо подвергшихся ущербам от засух, может быть значительно меньше указанного числа.

Другие параметры распределений числа пострадавших: среднее число пострадавших от одной засухи, входящей в базу данных, – 5 477 тыс. чел., медиана – 655 тыс. чел., мода – 1 млн чел., коэффициент вариации – 4,62, коэффициент асимметрии – 9,35. В связи с последним числом можно заметить, что C_S, как и в случае с наводнениями мира, непрерывно растет при переходе от «нейтральных» параметров засух к параметрам, отражающим опасность для людей: для географических координат центров регионов засух и дат начала засух C_S меньше единицы, для продолжительности засух – 1,7; для материальных ущербов – 5,6; для числа пострадавших – 9,4.

На рис. 15 показана гистограмма плотности вероятности пострадавших от засух, удовлетворительно описываемая логнормальным распределением.

На рис. 16 показаны изменения во времени средне годового числа пострадавших от засух. Как и рассмотренные ранее ряды других параметров засух, ряд на рис. 16 описывается реализацией «белого шума». Параметры модели:

коэффициент коррелированности смежных величин исходного ряда – 0,041; пересчитанного в выборочные значения гауссовских величин +0,101; порядки авторегрессионых моделей в обоих случаях нулевые; значения индексов стационарности: I_{SM} = +0,33; I_{SS} = –0,40; I_{SR} = –0,21.

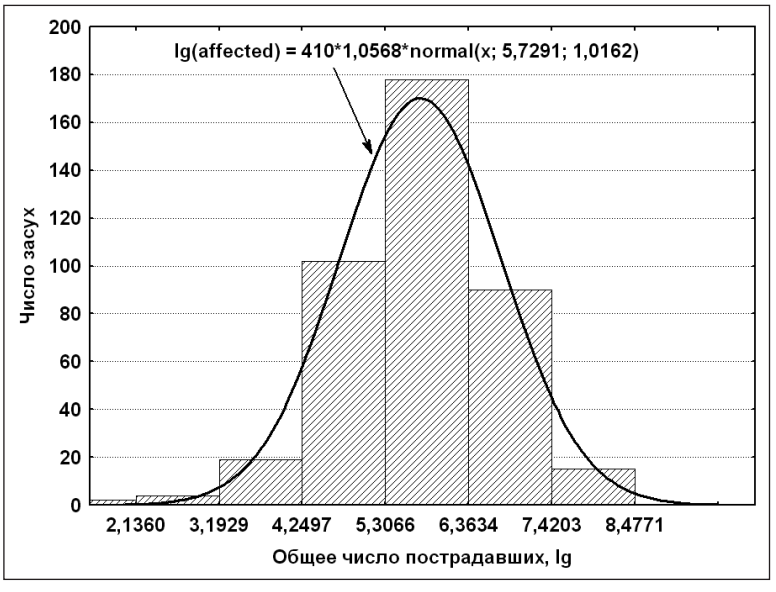

Рис. 15. Гистограмма плотности вероятности числа пострадавших от засух

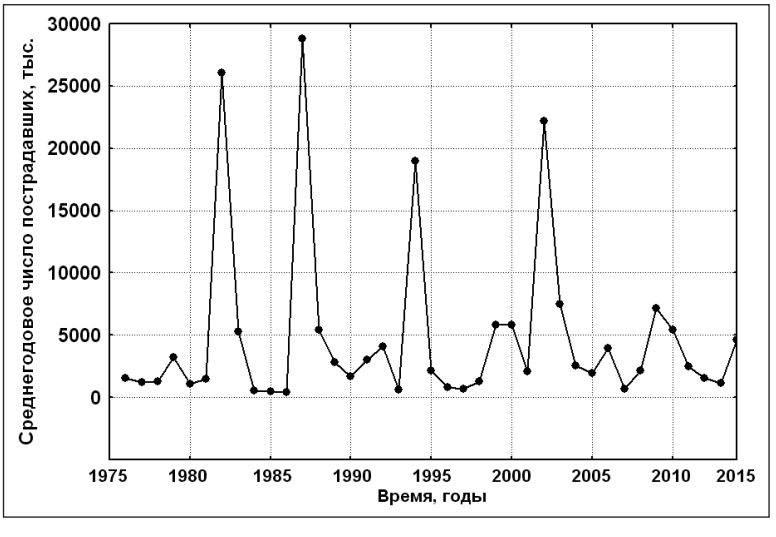

Рис. 16. Изменения во времени средне годового числа пострадавших от засух в мире

Наконец, наиболее трагическое последствие засух – смертельные случаи. По имеющейся у нас информации, общее число погибших от засух с 1900 г. составило 10 500 тыс. чел. – число, сопоставимое с числами погибших в мировых войнах. Наиболее трагичной была засуха в Китае в 1928 г. – около 3 000 000 погибших, в 1943 г. на территории современной Бангладеш (тогда – Индии) погибли 1 900 000 чел.

Обсуждение результатов

В настоящий момент имеется возможность представить более подробную картину засух мира и их динамики, чем в предыдущих исследованиях, в том числе в работе [7]. В целом засухи приводят к значительным материальным и финансовым потерям (в наибольшей степени – в развитых странах), но еще более чувствительны и нетерпимы социальные (гуманитарные) ущербы от засух; более 2 млрд пострадавших и более 10 млн погибших (в основном – в развивающихся странах).

Парадоксальным образом среднее широтное распределение ущербов от засух примерно совпадает с аналогичным распределением для наводнений. Это указывает на то, что и то, и другое катастрофическое явление имеет не только и даже не столько природные, сколько социально-экономические причины: в обоих случаях наибольшие материальные ущербы наблюдаются в наиболее развитых странах, наибольшие гуманитарные ущербы – в регионах с наибольшей плотностью населения.

На протяжении всего XX в., в особенности за последние десятилетия, наблюдался формальный рост частоты засух и ущербов от засух. Однако чрезвычайно трудно отделить действительные изменения количества засух и ущербов от них от формального роста, связанного с увеличением объемов информации о засухах. Более надежными параметрами являются относительные характеристики – например, величины различных параметров, приходящиеся в среднем на одну засуху. Такого рода относительные параметры (как природные, так и характеристики ущербов) не обнаруживают статистически значимого роста за последние 40 лет, то есть за период наиболее интенсивного роста глобальной температуры.

Литература

1. *Авакян А.Б.* Наводнения. Концепция защиты // Изв. РАН. Сер. Географическая. 2000, № 5. – С. 40–46.
2. *Авакян А.Б., Истомина М.Н.* Наводнения как глобальная многоаспектная проблема // Вестник РАН. 2002. Т. 72, № 12. – С. 1–21.
3. *Добровольский С.Г.* Аномалии глобального тепловлагообмена. – М.: Сов. геофизич. комитет, 1991. – 128 с.
4. *Добровольский С.Г.* Климатические изменения в системе «гидросфера – атмосфера». – М.: Геос, 2002. – 256 с.
5. *Добровольский С.Г.* Глобальные изменения речного стока. – М.: Геос, 2011. – 660 с.
6. *Добровольский С.Г.* Межгодовые и многолетние изменения стока рек мира // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 6. – С. 643–660.
7. *Добровольский С.Г.* Засухи мира и их эволюция во времени: сельскохозяйственный, метеорологический и гидрологический аспекты // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 2. – С. 119–132.
8. *Добровольский С.Г., Истомина М.Н.* Наводнения мира. – М.: Геос, 2006. – 256 с.

9. *Добровольский С.Г., Истомина М.Н.* Характеристика наводнений на территории России по природным и социально-экономическим параметрам // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. – С. 515–531.
10. *Истомина М.Н., Кочарян А.Г., Лебедева И.П.* Наводнения: генезис, социально-экономические и экологические последствия наводнений // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 4. – С. 1–10.
11. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Митина Ю.В.* Изменчивость невских наводнений и морского уровня в Финском заливе в современных климатических условиях // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 5. – С. 544–556.
12. *Малинин В.Н., Митина Ю.В., Шевчук О.И.* К оценке затопления побережья курортного района Санкт-Петербурга при прохождении экстремальных наводненческих циклонов // Учен. зап. РГГМУ. 2013, № 29. – С. 138–144.
13. *Экстремальные* гидрологические ситуации. – М.: Медиа-Пресс, 2010. – 464 с.
14. *Экстремальные* гидрологические события: теория, моделирование и прогнозирование. – М.: ИВП РАН, 2003. – 380 с.
15. *Alley W.M.* 1984: Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions // Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, vol. 23, pp. 1100–1109.
16. *Dai A., Trenberth K.E., Qian T.* A global dataset of Palmer Severity Index for 1870 – 2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming // Journal of Hydrometeorology, 2004, vol. 5, pp. 1117–1130.
17. *Dobrovolski S.G.* Global climatic changes in water and heat transfer-accumulation processes. – Amsterdam et al.: Elsevier, 1992. – 282 p.
18. *Dobrovolski S.G.* Stochastic climate theory. – Berlin, Heidelberg et al.: Springer, 2000. – 296 p.
19. *Domonkos P., Szalai S, Zoboki J.* Analysis of drought severity using PDSI and SPI indices // Idoejaras, 2001, vol. 105, pp. 93–107.
20. *Dos Santos R.M.N., Pereira A.R.* 1999: Palmer drought severity index for western Sao Paulo state, Brazil // Review of Brazil Agrometeorology, 1999, vol. 7, pp. 139–145.
21. International Disaster Database. – [Электронный ресурс] URL: http://www.emdat.be/.
22. *Istomina M.N., Dobrovolski S.G.* Floods of the world: quantitative analysis of natural characteristics and parameters of social-economic damages // Water Resources, 2016, v. 43, pp. 459–471.
23. *Nicholls, N.* The changing nature of Australian droughts // Climatic Change, 2004, vol. 63, pp. 323-336.
24. *Palmer W.C.* 1965: Meteorological drought. Research Paper 45. – Washington, DC: U.S. Dept. of Commerce, 1965. – 58 p.
25. *Privalsky V.E., Jensen D.T.* Time series analysis package. Autoregressive time and frequency domain analysis of scalar and multi-variate time series. – Logan, UT: Utah Climate Center, Utah University, 1992. – 61 p.
26. *Statistica* for Windows. Volume I. – Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 2008. – 877 p.
27. *Ulrych T.J, Bishop T.* Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition // Review of Geophysics and Space Physics, 1975, vol. 13, pp. 183–200.

УДК 502.3:[551.501.815+551.501.816+528.7](470.23-25)

Д.А. Самуленков, И.Н. Мельникова, В.К. Донченко, М.В. Сапунов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ЛИДАРНОГО МОНИТОРИНГА

Ресурсный центр «Обсерватория экологической безопасности» научного парка Санкт-Петербургского государственного университета, i.melnikova@spbu.ru

D.A. Samulenkov, I.N. Melnikova, V.K. Donchenko, M.V. Sapunov

STUDYING POLLUTION OF THE ATMOSPHERE WITH LIDAR MONITORING

В статье изложены основные положения разработки новых дистанционных методов исследований экологического климата атмосферы. Рассмотрены лидарные средства измерений атмосферных загрязнений над Санкт-Петербургом. Показаны возможности проведения исследований с применением мобильного лидарного комплекса. Представлены результаты лидарных измерений, полученные с помощью стационарного лидарного комплекса. Проведен анализ полученных данных совместно с данными аэрологического зондирования. Лидарное зондирование совместно с данными аэрологического зондирования позволяет проводить исследования в экологической области дистанционным методом.

Ключевые слова: *аэрозольный лидар, доплеровский лидар, атмосферное загрязнение, аэрозоли, экологическая безопасность.*

The article outlines the main provisions for the development of new remote methods for studying the ecological climate of the atmosphere. Lidar means of measuring atmospheric pollution over St. Petersburg are considered. The possibilities of conducting research using a mobile lidar complex are shown. The results of lidar measurements obtained with the aid of a stationary lidar complex are presented. The obtained data are analyzed together with aerological sounding data. Lidar sounding supplemented with data of aerological sounding provide conduct studies in the ecological field by a remote method on a global scale.

Keywords: *aerosol lidar, doppler lidar, atmospheric pollution, aerosols, environmental safety.*

Введение

Атмосферные загрязнения формируются под воздействием множества факторов, таких как антропогенные выбросы, естественные источники и метеорологические параметры. Среди основных источников антропогенного загрязнения атмосферы выделяют выбросы, выделяющиеся в ходе промышленных процессов, продукты сгорания органического топлива, частицы, образующиеся при изнашивании автомобильных шин. За естественные источники загрязнения принимают те, формирование которых не зависит от деятельности человека. Например, при испарении капель морской пены выделяются частицы соли, растения производят пыльцу, ветер уносит частицы почвы и разносит пыль.

Автодороги являются одним из источников образования пыли в приземном воздушном слое. При движении автомобилей происходит истирание дорожных покрытий и автомобильных шин, продукты износа которых смешиваются с твердыми

частицами отработанных газов. К этому добавляется грязь, занесенная на проезжую часть с прилегающего к дороге почвенного слоя. В результате образуется пыль, поднимающаяся в воздух. Она может переноситься ветром на расстояния от нескольких до сотен километров.

Компоненты атмосферных аэрозолей, как и метеопараметры, обладают высокой изменчивостью в атмосфере. Потоки воздушных масс переносят атмосферные загрязнения на большие расстояния, и поэтому важно установить их преимущественные направления.

В приземном слое атмосферы толщиной 1–2 км создаются особые условия динамического режима, происходит интенсивный обмен с поверхностью энергией и веществом. В условиях большого города это приводит к возникновению шапки загрязнений над городом. Безветренная погода усиливает концентрацию атмосферных аэрозолей, состоящих в основном из пылевых и сажевых частиц.

Для определения вертикальной структуры шапки загрязнений над большим городом на примере Санкт-Петербурга используются результаты лидарного зондирования атмосферы. Также необходимо использовать при анализе результаты регулярного аэрологического зондирования с помощью радиозондов, определяющие вертикальные профили метеопараметров. Сопоставление особенностей вертикальных профилей содержания и характеристик атмосферных аэрозолей, температуры, влажности и характеристик ветра помогает выявлять ключевые факторы формирования атмосферных загрязнений и преимущественные направления их переноса. Сравнение с вертикальным распределением аэрозолей над Финским заливом поможет пониманию особенностей формирования городской атмосферы.

Лидарное оборудование

В Санкт-Петербурге осуществляется исследование атмосферы, проводятся регулярные лидарные и радиометрические измерения в рамках сетей EARLINET и AERONET, что дает возможность исследовать вертикальную структуру атмосферных загрязнений над исследуемыми территориями. Важнейшим элементом при выполнении подобных изысканий является получение данных натурных экспериментальных измерений: в условиях города – с помощью стационарных лидарных систем и за городом – с помощью мобильной лидарной системы, смонтированной на автомобильной платформе. Экспериментальные данные высокого качества и строгие теоретические методы, позволяющие проводить расчеты важных характеристик, необходимых для выполнения климатических прогнозов, будут способствовать полному учету информации о состоянии атмосферы и позволят создать модели атмосферы, наиболее адекватные реальности.

Стационарная лидарная система обеспечивает сбор информации из нижнего приземного слоя атмосферы и из тропосферы. Результатами измерений являются вертикальные профили параметров атмосферного аэрозоля: средний и эффективный радиусы частиц; числовая, поверхностная, объемная и массовая концентрации частиц; комплексный показатель преломления вещества частиц; коэффициент деполяризации; коэффициенты обратного рассеяния и экстинкции аэрозоля; размер детектируемых аэрозолей в диапазоне от 0,1 до 11 мкм; определение

перечисленных параметров загрязнений на наклонных и горизонтальных трассах, а также параметры атмосферы: скорость ветра; турбулентность; направление ветра.

Лидарные системы позволяют:

– определять местоположение и отслеживать эволюцию естественных и искусственных аэрозольных образований в атмосфере;

– исследовать физическую структуру аэрозоля и оценивать интегральный размер частиц аэрозоля;

– дистанционно определять скорость и направление ветра на различных высотах;

– вести картографирование местности с нанесением на цифровую карту местности концентраций аэрозолей и химических примесей в атмосфере;

– формировать прогноз распространения примесей в атмосфере по результатам измерений концентраций примесей и по измеренной актуальной ветровой обстановке;

– оперативно выявлять источники загрязнения атмосферы;

– формировать заданную форму отчетов по результатам измерений;

– хранить базы данных проведенных ранее измерений и управлять ими.

В состав стационарного многоволнового комплекса включены: доплеровский гетеродинный лидар для измерения скорости и направления ветра с диапазоном измерения скорости ветра от 0,5 до 40 м/с и погрешностью менее 0,5 м/с, а также погрешностью измерения направления ветра не более 5º; и аэрозольный лидар с излучателем в виде Nd:YAG-лазера, работающим на следующих длинах волн: 355; 532 и 1064 нм.

Мобильный лидарный комплекс (рис. 1) является транспортируемым модулем на носителе (платформе масштаба микроавтобуса), в котором размещается оборудование лидарной системы и кабина управления, и позволяет проводить

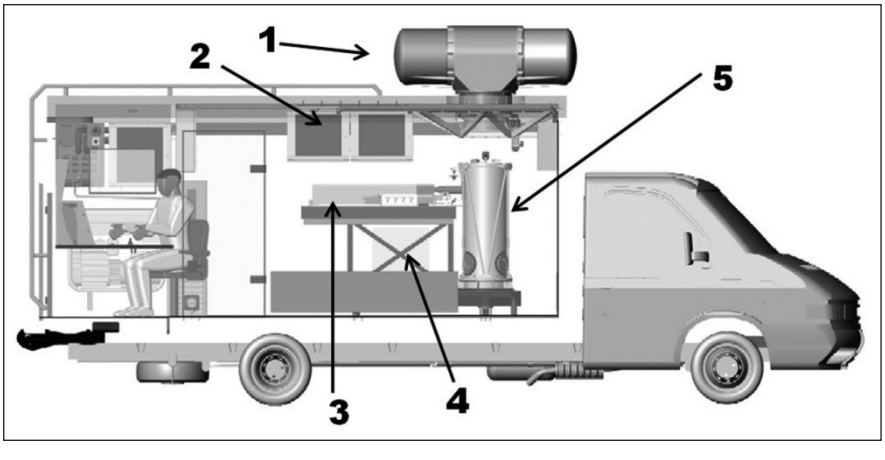

Рис. 1. Схема мобильного лидарного комплекса: *1* – сканер;
2 – система управления измерительными приборами; *3* – аэрозольный лидар;
4 – антивибрационный оптический стол; *5* – телескоп

экологический мониторинг в различных географических точках в полевых условиях. Мобильный комплекс представляет собой полностью автономную и высоко автоматизированную систему, имеющую собственное энергоснабжение и климатическую установку. В мобильном комплексе также установлен коротковолновый лидар дифференциального поглощения (КВ-ДП) с перестраиваемым многоволновым Ti:Sph-лазером (700–960, 350–480, 230–310 нм). Дополнительный лидар позволяет дистанционно детектировать концентрацию малых газов в атмосфере (SO_2, NO_2, Cl_2, O_3), линии поглощения которых совпадают с диапазоном излучения лазера [1].

Ассимиляция данных о направлении и скорости распространения экотоксикантов позволяет оперативно оценивать риски наступления экологически опасной ситуации, строить прогнозы развития загрязнения окружающей среды и формировать рекомендации для лиц, принимающих решения, обеспечивая возможность быстрого реагирования для устранения опасности или эвакуации населения [10, 11]. Решение задачи оценки рисков позволяет отслеживать объективные числовые значения, характеризующие состояние окружающей среды, в частности состояние среды большого города. Такую задачу следует назвать обратной задачей экологического мониторинга [3, 4], которая включает в себя следующие этапы:

1. Обработка данных наземного оптического зондирования.
2. Решение обратной задачи оптики лазеров (результат – оптические параметры атмосферы – коэффициенты поглощения и рассеяния и индикатриса рассеяния).
3. Решение обратной задачи микрофизики аэрозолей (концентрации примесей в атмосфере, размер аэрозольных частиц, направление и скорость их переноса в атмосфере).
4. Решение обратной задачи экологической безопасности – параметризация характеристик атмосферных примесей в терминах теории риска для расчета рисков тех или иных событий (превышение концентрации загрязнителей ПДК в атмосфере и направление их распространения в сторону густонаселенных районов).
5. Оперативное определение значений рисков тех или иных экологически опасных событий позволяет проводить управление устойчивым развитием региона.

Полученные результаты и их анализ

Стационарный и мобильный многоволновые лидарные комплексы [1] дают информацию о концентрации и физической природе атмосферного аэрозоля, о химическом составе газовой фазы атмосферы, о ветре и турбулентности на расстоянии до 10–12 км на вертикальной и наклонных трассах в любых направлениях. Лидарный комплекс включает в себя комплектующие и технологии современного уровня, как российских, так и зарубежных производителей, и позволяет осуществлять дистанционное зондирование в широком спектральном диапазоне длин волн.

Лазерные импульсы длительностью порядка 10 нс, распространяясь в атмосфере, взаимодействуют с различными ее составляющими и частично рассеиваются назад к лидару. Сигналы обратного рассеяния в атмосфере от каждого лазера

принимаются одним телескопом и направляются на соответствующий приемник. Принятый сигнал передается в управляющий компьютер, где происходит его обработка в реальном масштабе времени. В компьютере предусмотрена первичная обработка «сырого» сигнала (учет фоновой засветки, сглаживание по группе импульсов). В результате получаются временные вариации вертикальных профилей.

Далее решается *обратная задача лидарного зондирования* – восстановление концентраций определяемых веществ [2]. Для этого были разработаны специальные алгоритмы решения всего набора обратных задач, которые отличаются методами и подходами к регуляризации решений для разных исследуемых компонентов [14]. На выходе предлагается как сглаженный сигнал обратного лидарного рассеяния, так и информация о количестве загрязняющих веществ, их сравнение с пороговыми значениями, направление и скорость их распространения, то есть фактически осуществляется *первый этап обратной задачи экологической безопасности.*

Коэффициенты рассеяния аэрозоля

На рис. 2 представлены результаты лидарных измерений за 27 июля 2016 г., полученные с помощью стационарного лидарного комплекса, расположенного в здании Института наук о Земле при СПбГУ.

На них изображены пространственно-временные вариации аэрозольных слоев над городом [4]. Как видно из рисунков, аэрозольная шапка имеет несколько слоев различной плотности. Обратим внимание на то, что в начале измерений ее толщина достигала 2,6 км, а спустя 2 ч толщина слоя загрязнений уменьшилась и составила около 1,8 км. Вертикальная структура и динамические вариации сигнала указывают на выраженную стратификацию в атмосфере и заметную турбулентность.

Используя зарегистрированные значения сигнала обратного рассеяния лазерного излучения, восстанавливают оптические и микрофизические параметры частиц, то есть решают обратную задачу лидарного зондирования и обратную задачу теории рассеяния [5]. Оптические параметры – это объемные коэффициенты ослабления и обратного рассеяния на разных расстояниях по лучу зондирования. Эти коэффициенты позволяют решить задачу восстановления микрофизических параметров частиц: численное, поверхностное и объемное содержание частиц, распределение частиц по размерам на разных высотах (или расстояниях при зондировании на горизонтальных трассах), средний размер частиц, их комплексный показатель преломления, что дает информацию о веществе частицы. Измерения степени деполяризации частиц обеспечивают информацию о форме частиц.

Концентрация твердых загрязнений в атмосфере

Характеристикой количества аэрозольных частиц в воздухе является их *концентрация* (точнее, счетная концентрация) – число частиц в единице объема. Однако дисперсность аэрозолей приводит к тому, что задания одной концентрации для описания ансамбля аэрозольных частиц недостаточно – очевидно, что частицы различных радиусов могут иметь существенно разную концентрацию. Поскольку частицы разного размера имеют разную поверхность и объем, оценивают их поверхностную и объемную концентрации.

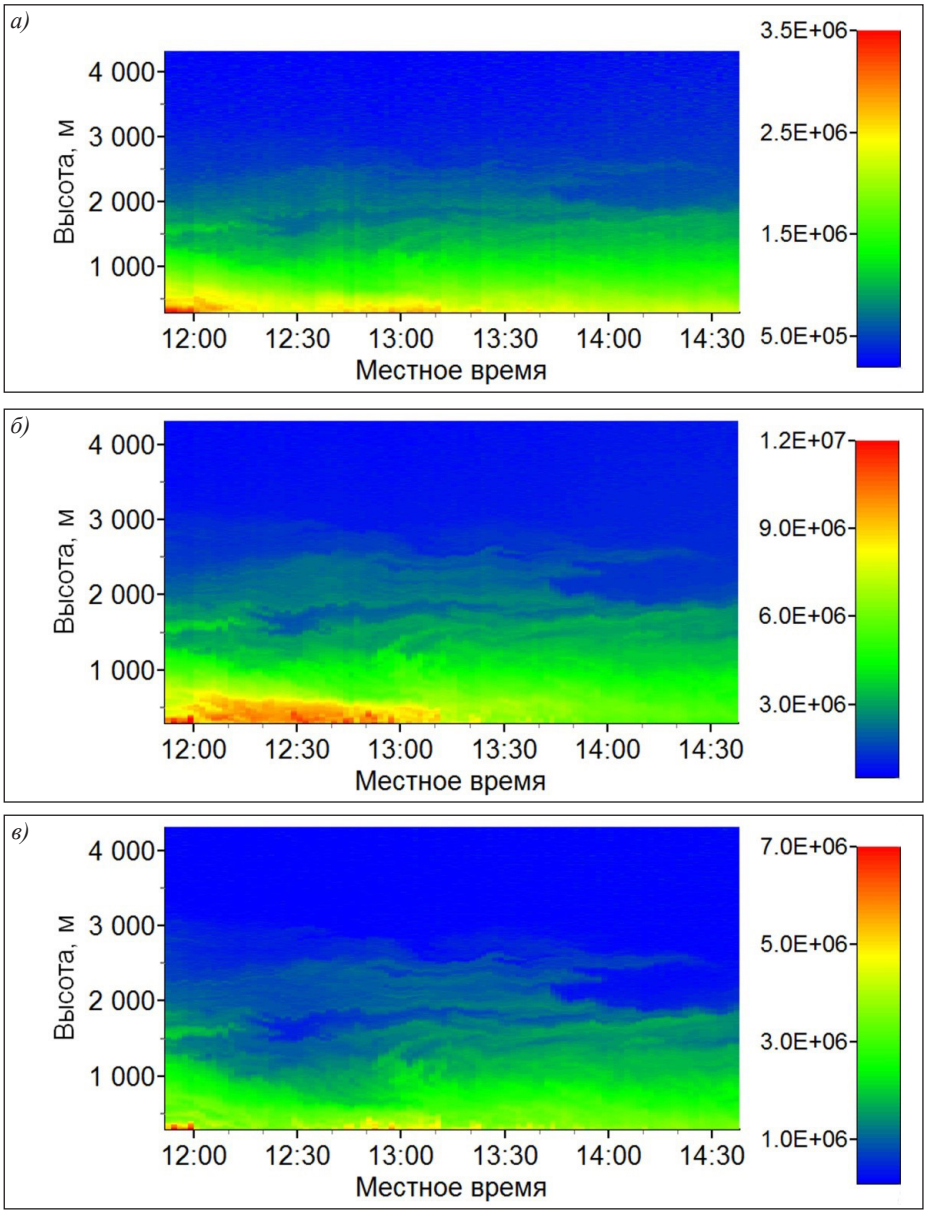

Рис. 2. Лидарные сигналы для трех каналов:
а – 355 нм; *б* – 532 нм; *в* – 1064 нм (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

На рис. 3 представлен вертикальный профиль численного, поверхностного и объемного содержания частиц в шапке загрязнений над городом, полученный из обработки данных измерений, показанных на рис. 2. Значения объемной

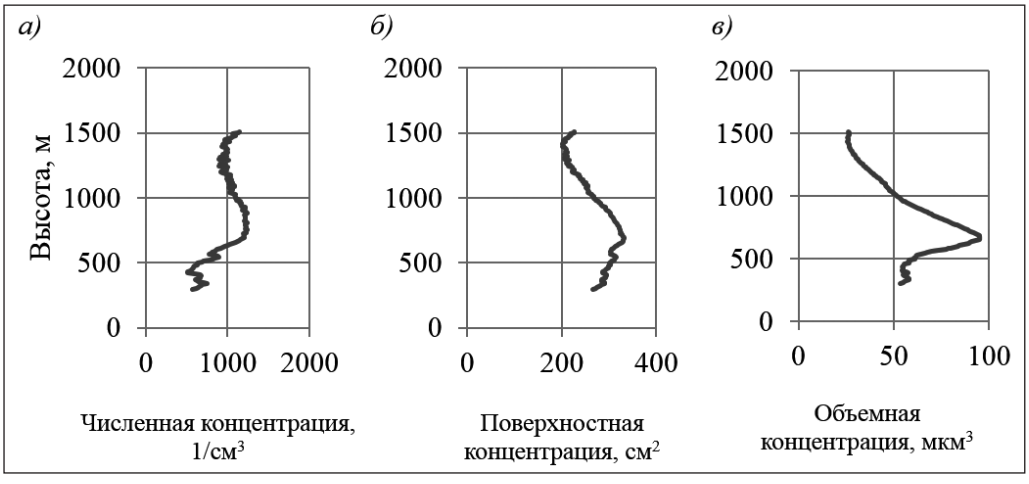

Рис. 3. Вертикальные профили содержания твердых частиц в шапке загрязнений:
а – численная концентрация; *б* – поверхностная концентрация;
в – объемная концентрация (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

концентрации частиц легко преобразовать в массовую концентрацию, умножая на плотность частиц, которая, в свою очередь, определяется по показателю преломления. Массовая концентрация загрязнений в атмосфере уже является экологическим параметром, и ее значения следует сравнивать с ПДК, а в случае превышения пороговых значений – оповещать лиц, принимающих решения: *решение обратной задачи экологической безопасности.*

Вертикальный профиль объемного распределения частиц по радиусам

Твердые частицы в атмосфере имеют существенно разные размеры. Этот разброс размеров аэрозольных частиц именуют их *дисперсностью*. Совокупность аэрозольных частиц всех возможных радиусов называется *ансамблем частиц*. Следовательно, необходимо ввести еще одну характеристику аэрозольного ансамбля, связывающую концентрацию и радиус $N(r)$.

Для определения функций распределения по размерам реальных ансамблей атмосферных аэрозолей используют такие экспериментальные измерения их концентрации, как функции радиуса, то есть $N(r)$. Далее полученные из обработки эксперимента функции $f(r)$ обычно аппроксимируют аналитическими выражениями. Одним из «наиболее популярных» является логарифмически нормальное распределение (сокращенно – логнормальное)

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} rs} \exp\left[-\frac{1}{2s^2} \ln^2 \left(r / r_0 \right) \right]. \qquad (1)$$

Логнормальное распределение (1) – это распределение величины, логарифм от которой распределен по нормальному (гауссову) закону. Оно полностью характеризуется двумя параметрами: средним (в смысле значения логарифма)

радиусом r_0 и дисперсией s. Первый из этих параметров характеризует общие размеры частиц ансамбля (чем больше r_0, тем в среднем крупнее частицы ансамбля), второй – разброс радиусов (чем больше s, тем меньше разница между концентрациями частиц разных радиусов).

На рис. 4 представлен вертикальный профиль объемного распределения частиц по размерам, полученный при обработке измерений стационарного лидарного комплекса 27 июля 2016 г. Как видно из графика, значительную часть аэрозольных частиц составили мелкие частицы PM1,0–PM3,5, причем содержание частиц со средним радиусом менее 1 мкм увеличивается в слое атмосферы ниже 600 м.

Для описания размеров частиц вводят средний и эффективный радиусы

$$r_{mean} = \int_0^\infty rN(r)dr \quad \text{и} \quad r_{eff} = \int_0^\infty r^3 N(r)dr \Big/ \int_0^\infty r^2 N(r)dr .$$

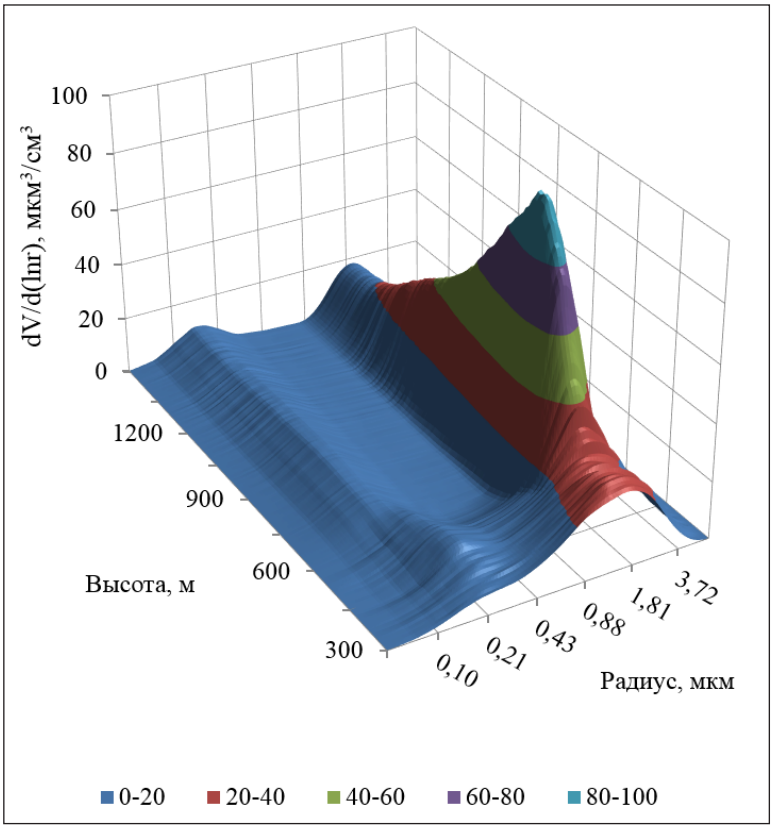

Рис. 4. Вертикальный профиль объемного распределения аэрозольных частиц по их радиусам (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

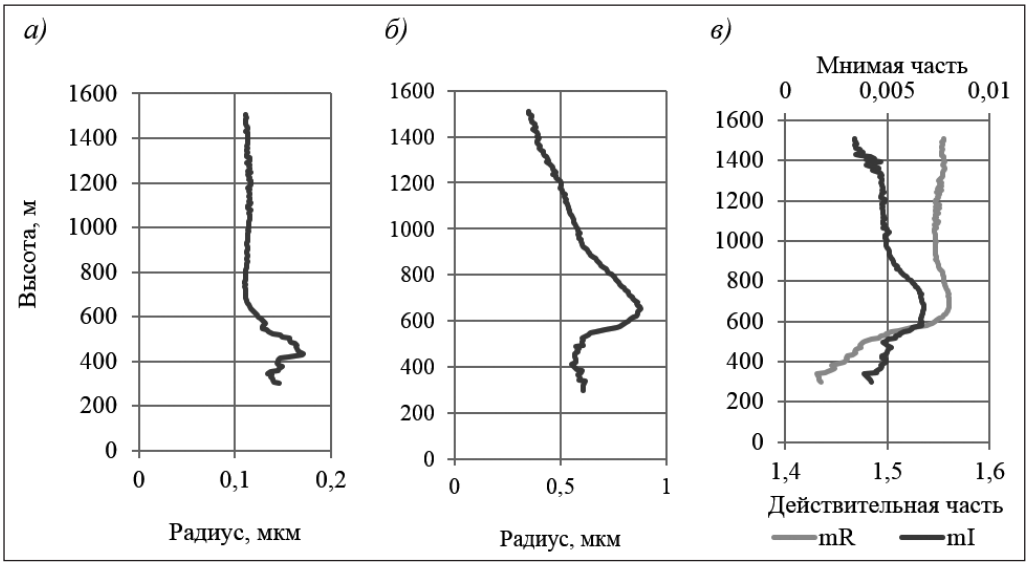

Рис. 5. Вертикальные профили средних размеров частиц: *а* – средний радиус; *б* – эффективный радиус; *в* – действительная (светлая линия) и мнимая (темная линия) части комплексного показателя преломления (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

На рис. 5, *а* и *б* показаны вертикальные профили этих параметров, восстановленные по лидарным измерениям, проведенным в стационарном лидарном комплексе 27 июля 2016 г. Видно, что зависимость от высоты различается. Максимум среднего радиуса расположен ниже: на высотах 400–600 м, в то время как максимум эффективного радиуса явно совпадает с максимумами обеих частей комплексного показателя преломления.

Значения комплексного показателя преломления (рис. 5, *в*) указывают на то, что ниже 600 м в атмосфере находятся частицы, менее поглощающие свет: Re = 1,44...1,50 и Im = 0,003...0,005, причем видно, что с высотой состав частиц резко меняется.

Это обстоятельство также ярко выражено на рис. 2 в видимом канале 532 нм значительно увеличенной яркостью сигнала. Выше 600 м действительная часть показателя преломления достигает значений Re = 1,55 и не меняется с высотой. Мнимая часть имеет максимум на высотах 600–800 м – Im = 0,007, а выше уменьшается до значений Im = 0,003. Полученные значения указывают на присутствие минеральной пыли ниже 600 м и сажи – выше 600 м. Соответственно, плотность вещества частиц можно оценить как 1,5 г/м^3 ниже 600 м и 2 г/м^3 выше 600 м. Тогда можно получить вертикальный профиль массовой концентрации частиц в шапке загрязнений атмосферы над Санкт-Петербургом, представленный на рис. 6 (27 июля 2016 г.).

Для более полной оценки состояния атмосферы на рис. 7 демонстрируются вертикальные профили метеорологических характеристик, полученных при аэрологических измерениях на метеостанции в пос. Воейково в 12 ч по всемирному координированному времени. Как видно из данных аэрологических измерений,

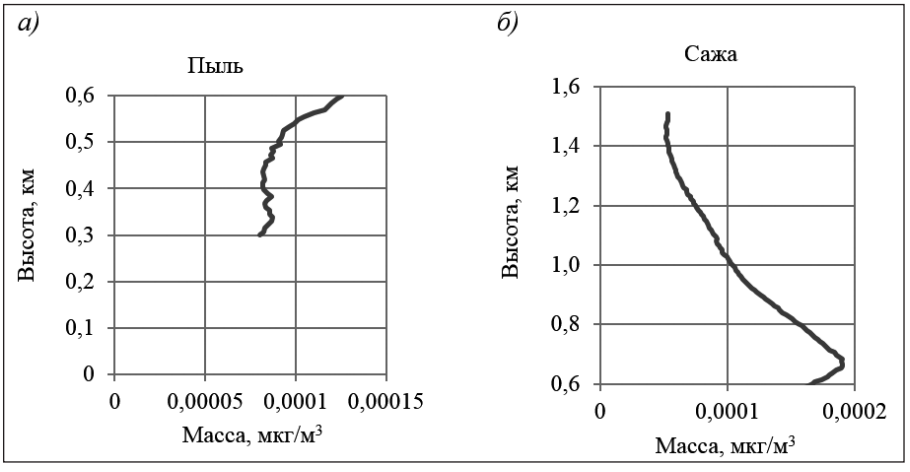

Рис. 6. Вертикальные профили массовой концентрации твердых аэрозолей:
а – пылевые; *б* – сажа (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

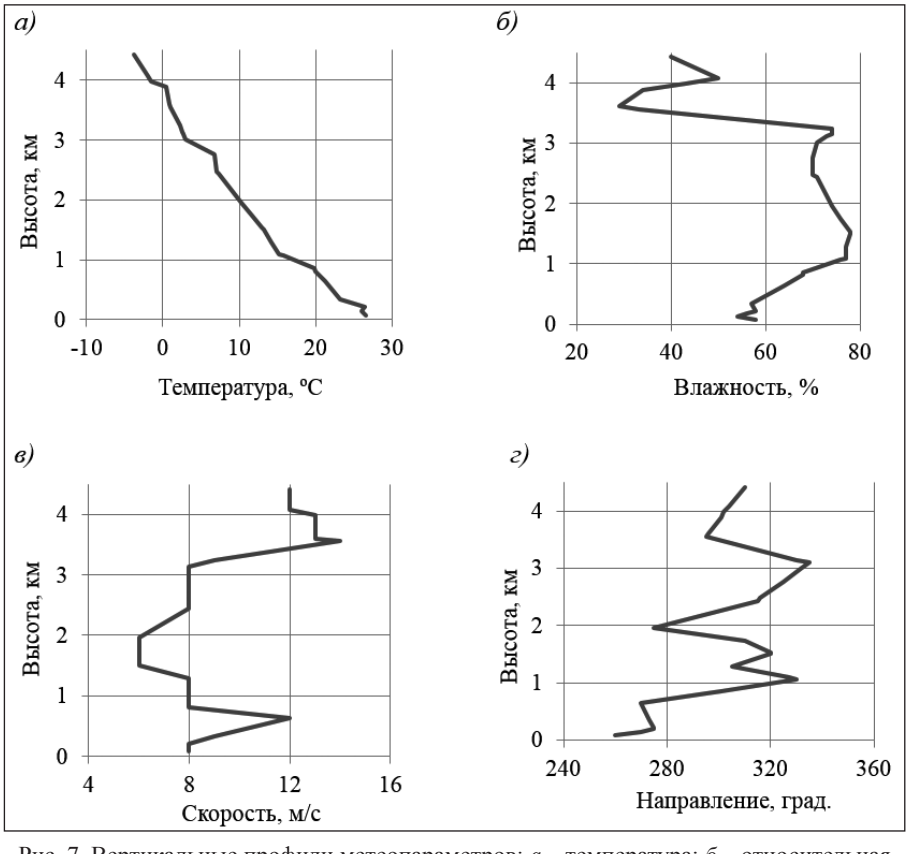

Рис. 7. Вертикальные профили метеопараметров: *а* – температура; *б* – относительная влажность; *в* – скорость ветра; *г* – направление ветра (пос. Воейково, 27 июля 2016 г.)

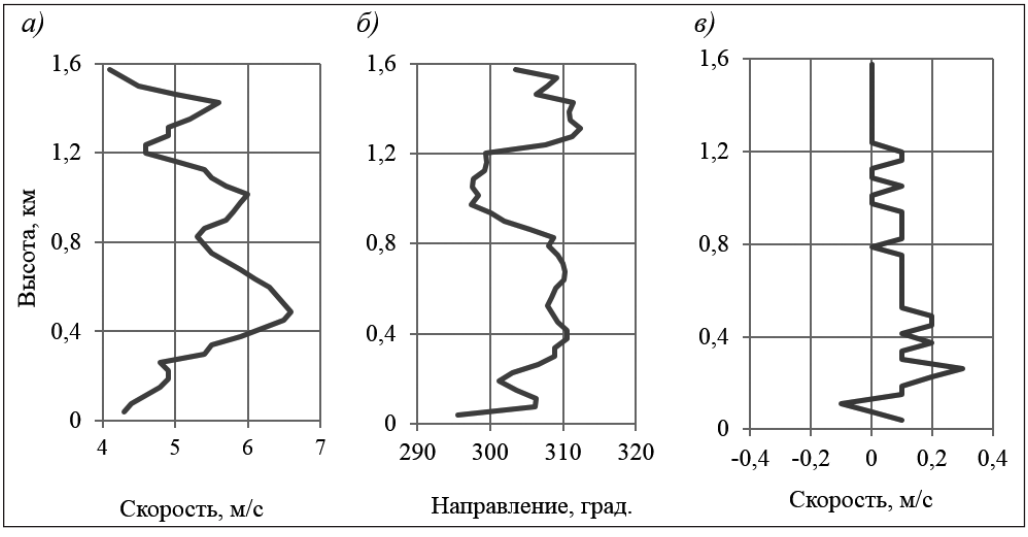

Рис. 8. Вертикальные профили характеристик ветра: *а* – горизонтальная скорость; *б* – направление; *в* – вертикальная составляющая (Санкт-Петербург, 27 июля 2016 г.)

в период проведения зондирования атмосфера характеризовалась высокой влажностью воздуха, изменчивостью ветра и значительными вариациями температурных градиентов. При этом в основном преобладали восходящие движения воздуха. Эти обстоятельства вызвали повышенную атмосферную турбулентность, что отчетливо видно и на рис. 2.

При этом следует отметить, что аэрологическая станция расположена в 25 км от места проведения измерений, и нижние слои атмосферы пригорода и города несколько отличаются по своим характеристикам [6]. Поэтому для анализа характеристик ветра в более высоких слоях атмосферы используются данные метеозонда, а на более низких уровнях – доплеровского лидара [7], входящего в состав стационарного лидарного комплекса (рис. 8).

Доплеровский лидар обладает большей дискретностью по высоте, чем радиозонд, что обеспечивает более детальный профиль ветра, который может обеспечить более точное определение источников атмосферного загрязнения, располагающихся в пределах города. Для определения загрязнителей за пределами города можно воспользоваться моделью HYSPLIT, которая позволяет построить простую траекторию движения воздушных масс на глобальной карте (рис. 9).

Как видно из рис. 9, в день проведения измерений воздушная масса, располагавшаяся на высотах 1000, 1500 и 2000 м, преодолела Финский залив, придя со стороны Балтийского моря. Анализируя такие данные, можно судить о состоянии атмосферы над Финским заливом и Балтийским морем. Однако следует учесть влияние загрязнителей, расположенных в непосредственной близости от места проведения измерений, таких как промышленные суда.

Для решения задач мониторинга судовых выбросов в атмосферу может быть использован мобильный лидарный комплекс. С его помощью проводятся исследования в непосредственной близости от предполагаемых загрязнителей,

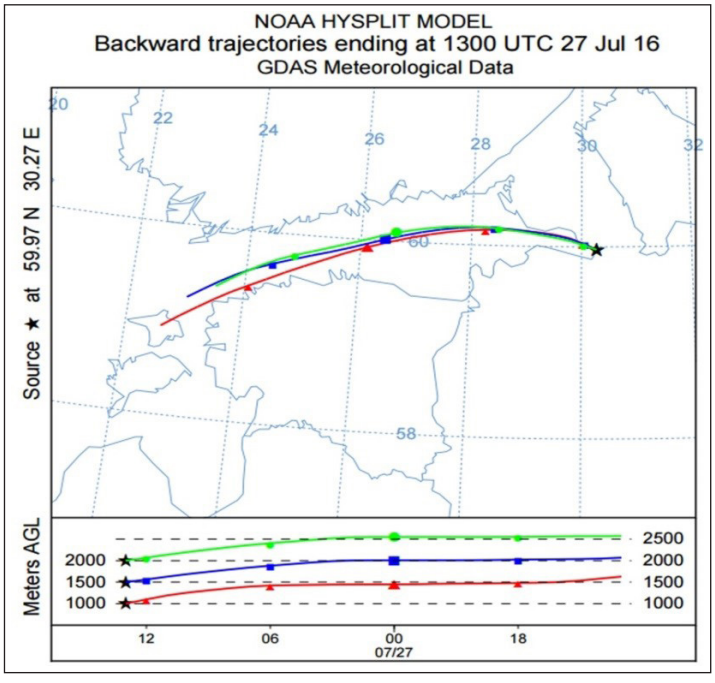

Рис. 9. Траектории движения воздушных масс,
достигших Санкт-Петербурга 27 июля 2016 г.

измерения, кроме того, можно осуществлять по наклонным и горизонтальным трассам, что позволяет направить лидар непосредственно на изучаемые выхлопы. Имея данные от каждого загрязнителя, можно исключить смешивание газов при исследовании и проводить анализ для каждого загрязнителя отдельно. С помощью этого подхода предоставляется возможность составлять классификацию источников атмосферного загрязнения, что, в свою очередь, обеспечивает детальный и адекватный прогноз экологически опасных зон и степени экологического риска.

Влияние твердых загрязнений атмосферы на здоровье городского населения

В городах с интенсивной и постоянной шапкой загрязнений наблюдается значительное увеличение заболеваемости органов дыхания и глаз, сердечно-сосудистой системы, отмечаются разного рода аллергические реакции. Влияние аэрозолей характеризуется хроническим действием, то есть постоянное воздействие с течением времени приводит к негативным физиологическим изменениям организма. От такого влияния страдает большинство населения.

Рис. 10 показывает глубину проникновения аэрозольных частиц в зависимости от их диаметра: чем более мелкий аэрозоль, тем глубже он проникает в легкие. Аэрозоль диаметром более 10 мкм осаждается в области носа и горла,

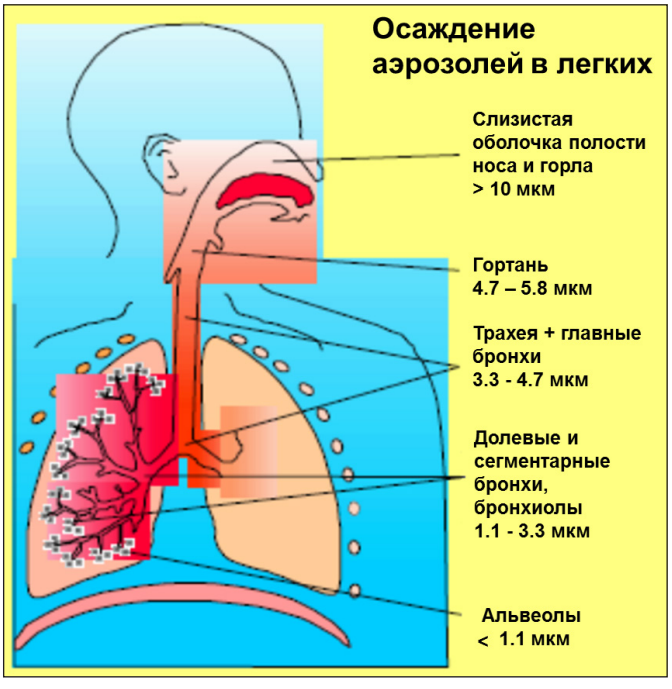

Рис. 10. Осаждение частиц разных размеров
в дыхательной системе человека

аэрозоль менее 4 мкм попадает в гортань и основные бронхи и достигает легких. Частицы диаметром менее 1 мкм достигают легочных альвеол.

Исследования [15] указывают на то, что на здоровье в первую очередь оказывают отрицательное воздействие аэрозольные частицы <1 мкм. Так, в исследовании рассматривается влияние аэрозольных частиц диаметром от 0,01 до 2,5 мкм, показано, что такие симптомы, как кашель и ощущение себя больным в течение дня, чаще обнаруживались при наличии самых мелких аэрозольных частиц (0,01–0,1 мкм). Опасность несут и различные частицы металлов, входящие в состав аэрозолей. Так, исследование, опубликованное в 2015 г. [13], показало, что воздействие компонентов твердых частиц, в частности железа, приводит к повышению диастолического артериального давления у детей.

Исследования, проведенные в крупных выборках городского населения Нидерландов с использованием национальной базы данных, показали связь длительного воздействия загрязненного воздуха со смертностью в городских условиях. Была сформирована большая группа 7,1 млн человек в возрасте 30 лет и старше, которая исследовалась в течение семи лет (2004–2011 гг.). По результатам исследований показано, что долгосрочное воздействие твердых мелких частиц воздуха размером меньше PM 10 достоверно повышало смертность от респираторных заболеваний, в том числе от рака легких. Кроме того, частицы размером менее PM 10 связаны со смертностью от сердечно-сосудистых заболеваний [10]. Схожие

выводы сделаны в работе [12], где показано, что долгосрочное воздействие частиц PM 2,5 и PM 10 повышает риск инсульта, и представлены доказательства воздействия пыли PM 2,5–10 из пустыни Сахара на увеличение смертности от сердечных заболеваний. Исследования [9] показали, что PM 2,5 вносит значительный вклад в инициирование острых сосудистых заболеваний у восприимчивых людей.

Кроме того, загрязнение атмосферы оказывает вредное воздействие на здания и сооружения города, памятники культуры [8], что ведет к увеличению расходования бюджетных средств на их восстановление.

Заключение

Лидарные измерения проводятся с высокой пространственной дискретностью, что способствует детальному исследованию атмосферных слоев и выявлению источников загрязнений. Кроме того, это единственный на данный момент метод дистанционного измерения аэрозолей. При комбинировании лазерного и аэрологического зондирований атмосферы появляется возможность комплексного исследования, дающего информацию не только об аэрозольном составе атмосферы, но и о направлении появления аэрозолей и пути их дальнейшего следования.

В проведенном 27 июля 2016 г. исследовании в Санкт-Петербурге было выявлено, что в течение около 3 ч аэрозольная шапка над городом достигала высоты 2200 м. Несмотря на то что конструктивные особенности телескопа, используемого в исследовании лидара, не позволяют проводить измерения ниже 300 м и благодаря анализу высотно-временной изменчивости оптических коэффициентов было зафиксировано, что аэрозольная шапка обладала как минимум тремя ярко выраженными слоями различной оптической плотности.

Восстановленные по оптическим коэффициентам микрофизические параметры указывают на то, что в атмосфере наблюдалось наибольшее уплотнение частиц на высоте около 750 м. Согласно данным ветрового доплеровского лидара этой высоте соответствует максимальный по скорости ветер, а также имеются деления на три слоя: по скорости (3 пика на профиле) и по направлению. Кроме того, вертикальная составляющая вектора скорости ветра говорит о том, что во время исследования частицы поднимались с нижних слоев атмосферной шапки, это объясняется дневным нагревом почвы (объектов антропогенного происхождения). Модель траектории движения воздушных масс, восстановленная по аэрологическим данным, указывает на то, что происхождение наблюдаемых в исследовании аэрозольных частиц является частично морским.

Лидарное оборудование до сих пор использовалось преимущественно в стационарном режиме, однако мобильная версия РЦ «Обсерватория экологической безопасности» СПбГУ позволяет проводить исследования в любом доступном транспорту месте. При использовании мобильного лидарного комплекса можно исключить фактор смешивания атмосферных примесей от разных источников, проводя исследование непосредственно у источника загрязнений, планировать измерения вне зависимости от направления ветра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-55-00131 Бел_а – Загрязнения и нагрев атмосферы над мегаполисом на основе моделирования переноса излучения и данных дистанционного зондирования.

Работа была выполнена с использованием оборудования ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности» научного парка СПбГУ.

Литература

1. *Борейшо А.С., Коняев М.А., Морозов А.В., Пикулик А.В., Савин А.В., Трилис А.В., Чакчир С.Я., Бойко Н.И., Власов Ю.Н., Никитаев С.П., Рожнов А.В.* Мобильные многоволновые лидарные комплексы // Квантовая электроника. 2005. Т. 12, № 35. – С. 1167–1178.
2. *Волков Н.Н.* Многоволновая лидарная система для определения физических параметров тропосферного аэрозоля: методика расчета параметров и анализа данных: автореф. дисс. … канд. техн. наук / МИИГАиК. – М., 2013. – 135 с.
3. *Донченко В.К., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Морозов А.В.* Использование мобильных лидарных комплексов для обратной задачи экологического мониторинга // Экология и космос. – СПб.: Петродворец, 2010. – С. 101–110.
4. *Донченко В.К., Самуленков Д.А., Мельникова И.Н., Борейшо А.С., Чугреев А.В.* Лазерные системы Ресурсного центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты // Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 3. – С. 122–132.
5. *Ивлев Л.С., Васильев А.В., Белан Б.Д., Панченко М.В., Терпугова С.А.* Оптикомикрофизические модели городского аэрозоля // Третья международная конференция «Естественные и антропогенные аэрозоли». Санкт-Петербург, 24.09–27.09.2001» / под ред. Л.С. Ивлева. – СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2003. – С. 161–170.
6. *Самуленков Д.А., Мельникова И.Н., Сапунов М. В., Донченко В.К., Кузнецов А.Д.* Различие дневных и ночных профилей шапки загрязнений в центре Санкт-Петербурга // Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. – С. 81–96.
7. *Сапунов М.В., Мельникова И.Н., Донченко В.К., Самуленков Д.А., Кузнецов А.Д.* Сопоставление вертикальных профилей скорости и направления ветра, полученных на основе лидарных и аэрологических измерений // Соврем. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. – С. 81–96.
8. *Bilenko N., Brunekreef B., Beelen R., Eeftens M., de Hoogh K., Hoek G., Koppelman G. H., Wang M., van Rossem L., Gehring U.* Associations between particulate matter composition and childhood blood pressure – The PIAMA study // Environment international No 84. 2015. P. 1–6.
9. *Brook R.D., Shin H.H., Bard R.L., Burnett R.T., Vette A., Croghan C., Thornburg J., Rodes Ch., Williams R.* Exploration of the Rapid Effects of Personal Fine Particulate Matter Exposure on Arterial Hemodynamics and Vascular Function during the Same Day // Environmental Health Perspectives. V. 119. № 5. 2011. P. 432–444.
10. *Fischer P.H., Marra M., Ameling C.B., Gerard H., Beelen R., de Hoogh K., Breugelmans O., Kruize H., Janssen N. A.H., Houthuijs D.* Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults: The Dutch Environmental Longitudinal Study (DUELS) // Environmental Health Perspectives, V. 123, No. 7, 2015, P. 697.
11. *Hoffmann B., Weinmayr G., Hennig F., Fuks K., Moebus S., Weimar Ch., Dragano N., Hermann D.M., Kälsch H., Mahabadi A.A., Erbel R., Jöckel K.-H.* Air Quality, Stroke and Coronary Events. Results of the Heinz Nixdorf Recall Study From the Ruhr Region // Deutsches Ärzteblatt International. 2015. 112. P. 95–201.
12. *Mallone S., Stafoggia M., Faustini A., Gobbi G.P., Marconi A., Forastiere F.* Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy // Environmental Health Perspectives. V. 119. № 10. 2011. P. 875–888.
13. *Tzanis C., Varotsos C., Christodoulakis J., Tidblad J., Ferm M., Ionescu A., Lefevre R.-A., Theodorakopoulou K., Kreislova K.* On the corrosion and soiling effects on materials by air pollution in Athens, Greece // Atmospheric Chemistry and Physics. 12/2011; 11:12039-12048. DOI: 10.5194/acp-11-12039-2011.
14. *Veselovskii I., Whiteman D.N., Kolgotin A., Andrews E., Korenskii M.* Demonstration of aerosol property profiling by multi-wavelength lidar under varying relative humidity conditions // J. of Atmospheric and Oceanic Tech. 2009. Vol. 26. P. 1543–1557.
15. *Wichmann H.-E., Kohmanns B., Koller U., Klemmer A., Haury H.-J. (Eds.)* Neueste Erkenntnisse zur Wirkung von Luftschadstoffen auf unsere Gesundheit // Macht uns die Umwelt krank? // GSF-Bericht 7/96. P. 37–38.

УДК [598.2: 591.524]:627.21(571.121)

В.А. Жигульский*, М.Б. Шилин**, Н.С. Царькова*, Н.Б. Глушковская**

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОРТОСТРОИТЕЛЬСТВА В АРКТИКЕ НА ОРНИТОФАУНУ НА ПРИМЕРЕ ПОРТА САБЕТТА

* ООО «Эко-Экспресс-Сервис», dir@ecoexp.ru; ** Российский государственный гидрометеорологический университет

V.A. Zhygulskij, M.B. Shilin, N.S. Tsarkova, N.B. Glushkovskaya

EFFECT OF HARBOUR CONSTRUCTION IN ARCTIC ON ORNITHOFAUNA ON THE PORT SABETTA TAKEN AS AN EXAMPLE

Описывается положительный эффект от строительства в Арктике крупного гидротехнического объекта – морского портового комплекса – на местную орнитофауну, выражающийся в увеличении видового разнообразия и количества гнездящихся птиц. В качестве причин положительного воздействия указываются введение природоохранных мер и появление новых биотопов антропогенного происхождения. Применительно к порту Сабетта применяется понятие «экологически дружественный порт».

Ключевые слова: *орнитофауна, водно-болотные птицы, гнездование, миграции, скопления птиц, экологически дружественный порт.*

Positive effect on the ornithofauna from the construction of macro-object – marine port complex – is described, realized in increasing of species diversity and number of nesting birds. As a causes of positive effect, the nature protection initiatives and appearance of new biotopes of anthropogenic origin are revealed. Port Sabetta is presented as an «environmentally friendly port».

Keywords: *ornithofauna, waterbirds, nesting, migrations, bird concentrations, environmentally friendly port.*

Введение

Опыт проведения портостроительных работ в морях бореальной зоны (Балтийское, Северное и др.) показывает, что из компонентов прибрежно-морских биологических сообществ особо чувствительны к данному виду антропогенного воздействия птицы и прежде всего так называемые водно-болотные (англ. –

waterbirds). Утки, чайки, кулики и другие подвергаются сильному стрессу от деформации береговой зоны, уничтожения прибрежной растительности, разрушения кормовых мелководий и т. д. Кроме того, на птиц негативно действует шум от работы землечерпателей, землесосов, драгирующего оборудования и пр. [2, 5, 6, 14, 16, 18].

В условиях Заполярья конкретных результатов наблюдений за реакцией птичьего населения на строительство портовых сооружений накоплено явно недостаточно для того, чтобы делать какие-то определенные количественные оценки. В связи с этим представляется интересным оценить состояние орнитофауны восточного побережья п-ова Ямал в районе строительства морского порта (МП) Сабетта, чтобы выявить влияние крупномасштабного портостроительства на орнитоценозы прибрежной тундры. Побережье п-ова Ямал относится к водно-болотным угодьям, имеющим большое значение для поддержания и воспроизводства популяций водоплавающих и околоводных птиц всего северо-востока Европы. Птицы являются важнейшим компонентом местных биологических сообществ. Они играют важную (а в летнее время – ключевую) роль в переносе вещества по пищевым цепям тундровой экосистемы. Вдобавок, птичье население является хорошим индикатором общего состояния прибрежно-морских экосистем [15, 16]. Исходя их вышесказанного, цель настоящего исследования сформулирована как оценка воздействия строительства крупного порта в условиях Арктики на орнитофауну на примере МП Сабетта.

1. Материал и методы исследований

Проект строительства МП Сабетта на п-ове Ямал, на побережье Обской губы, внесен постановлением Правительства РФ № 1201 от 30.12.2011 г. в подпрограмму «Морской транспорт» федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России (2010–2015 гг.)». Целью строительства МП Сабетта является создание транспортной и инженерной инфраструктуры для обеспечения отгрузки на морские транспортные суда сжиженного природного газа (СПГ) и газоконденсата (ГК) Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения (рис. 1). Строительство МП Сабетта и завода по производству СПГ начато в 2012 г. (рис. 2).

Проектная производительность МП Сабетта: отгрузка СПГ – до 16,5 млн т/год, ГК – до 1350 тыс. т/год. Режим работы МП – круглосуточный, 365 дней в году. Помимо собственно портостроительных гидротехнических работ, при формировании МП произведен капитальный дреджинг: углублены подходной канал к порту и судоходный фарватер в центральной части Обской губы. При реализации проекта применялись «экологически дружественные» технологии [2, 4, 13], позволяющие минимизировать негативные последствия строительства для прибрежно-морских экосистем.

В 2015–2016 гг. компания «Эко-Экспресс-Сервис» осуществляла комплексный экологический мониторинг состояния окружающей среды при строительстве объектов МП Сабетта. Научное обоснование программы мониторинга и оценка полученных результатов выполнены экспертами ООО «Эко-Экспресс-Сервис» совместно с сотрудниками кафедры экологии и биоресурсов Российского государственного

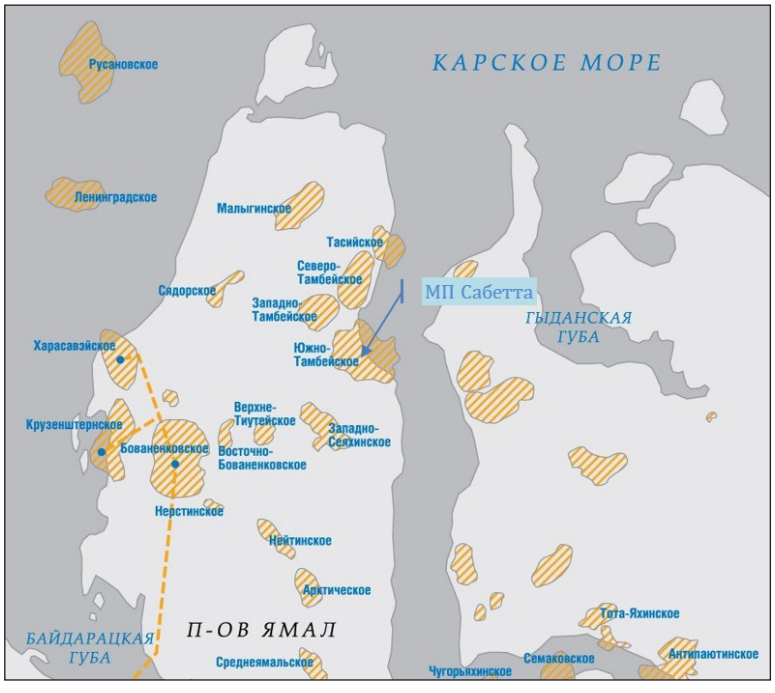

Рис. 1. Карта-схема расположения морского порта Сабетта и близлежащих газовых месторождений (стрелкой указано местонахождение порта, пунктирной линией – трассы магистральных газопроводов)

гидрометеорологического университета. Наблюдения за орнитоценозами проводились в июле–августе 2015 г. и июле–октябре 2016 г. Обследуемая территория была разделена на семь участков с различным характером антропогенного воздействия: участок 1 – зона тотального антропогенного воздействия на территориях строящегося порта и завода и функционирующего пос. Сабетта; участок 2 – зона сильного антропогенного воздействия в местах складирования труб и бетонных конструкций; участок 3 – зона естественных тундровых и озерных биотопов с незначительным влиянием строительства порта; участки 4–7 – зоны тундровых и озерных биотопов вне мест антропогенного воздействия.

Наблюдения за птицами производились методом тотального учета. Внутри каждого из семи участков прокладывался зигзагообразный маршрут с интервалом 100 м. При движении по маршруту использовались стандартные методы учетов без ограничения полосы обнаружения [1, 9, 12], а также методы визуальных наблюдений, рекомендованные Прибалтийской комиссией по изучению миграций птиц [17]. В работе использовался 25-кратный морской бинокль, бинокль Bresser Nautic 7×50, подзорная труба Nikon Scout 20×50. Все встреченные птицы фотографировались фотоаппаратом Nikon D90 с объективом Nikkor 300/4 с телеконвертером Nikon NC-1,7. В лабораторных условиях на мониторе компьютера производились точное определение вида, возраста и пола птиц и подсчет количества особей в стаях.

Рис. 2. Порт растет и днем, и ночью (фото: ООО «Фертоинг»)

2. Общая характеристика природных условий и животного мира

Территория МП Сабетта расположена в Восточно-Ямальской низинной провинции в подзоне арктических тундр [3]. Район наблюдений лежит в приморской полосе между устьями р. Сабетта-Яха и Няруй-Яха. Между ними протекает несколько мелких рек и ручьев с сильно меандрированными устьями. В их долинах имеется множество небольших пойменных озер старичного типа. Из них наиболее крупное – оз. Явхэвто, примыкающее к порту. Другое крупное озеро – Нямдгэвато – лежит в долине р. Няруй-Яха вне зоны влияния порта.

Большую часть года местные растительные сообщества испытывают воздействие штормовых холодных ветров и покрыты снегом и льдом. Основными лимитирующими факторами для них являются низкая температура и короткий сезон вегетации (около 60 дней) [7, 10]. Сезоны 2015–2016 гг. отличались теплыми погодными условиями в летний период. К началу наблюдений акватория Обской губы в районе порта была полностью свободна ото льда.

Толща вечной мерзлоты, залегающая на глубине нескольких десятков сантиметров от поверхности, препятствует просачиванию влаги в глубь почвы. В результате за 6–8 летних недель, когда солнце светит почти круглосуточно и поверхностные слои почвы оттаивают, тундра превращается в сплошную заболоченную территорию. В мелких водоемах выводятся из водяных личинок тучи мошки, служащей кормом для многочисленных перелетных птиц, которые прилетают сюда с юга для гнездования и выведения птенцов [10, 11].

Растительность тундры в районе исследований представлена мхами, лишайниками, злаками, некоторыми видами многолетних трав (пушица, осока, морошка), кустарничками (брусника, багульник, шикша, кассиопея) и невысокими кустарниками (ива, карликовая березка). Древесные растения отсутствуют. На сухих местах растительный покров состоит главным образом из ягелей – важнейших кормовых растений для диких и домашних северных оленей. В связи с медленным ростом ягеля одно и то же тундровое пастбище нельзя использовать несколько лет подряд, приходится все время переходить на новые участки. Если олени съедают на пастбище весь ягель, на восстановление лишайникового покрова требуется 10–15 лет. Помимо пастьбы, важным фактором воздействия оленей на лишайниковый покров является его вытаптывание. При разовом проходе стада уничтожается 10 % лишайникового покрова, при повторном – уже 20–25 %, при более частом прогоне стада возможно полное уничтожение лишайников [8].

Животный мир района исследований сформировался в условиях дефицита тепла, естественных укрытий и пищевых ресурсов, длительного сохранения снежного и ледяного покровов, а также вечномерзлых грунтов. Эти природные факторы определяют основные черты местной наземной фауны. Для нее характерен весьма ограниченный набор видов, адаптировавшихся к экстремальным условиям.

Зависимость от суровых внешних условий приводит к сильным колебаниям численности отдельных видов и общей зоомассы. В среднем величина зоомассы для ямальской тундры равна 70–90 кг/га [7]. В летнее время она резко возрастает, так как в тундру прилетают тысячи птиц выводить птенцов. Биомасса орнитофауны в местах концентрации птиц, главным образом у водоемов, в летний период достигает 160 кг/га, а в отдельных случаях – и 300 кг/га.

По мере приближения к морю увеличивается степень воздействия на наземную фауну элементов прибрежно-морской биоты – прежде всего морских птиц. Важной особенностью района исследований является интенсивное взаимодействие экосистем моря и суши, связанных между собой трофическими цепями. Четко очерченные границы прибрежной зоны отсутствуют из-за выровненности и открытости ландшафта. Воздействие океанических факторов на фауну распространяется глубоко в тундру и затрагивает ее животное население на значительных площадях.

Большинство животных, постоянно обитающих в тундре, – мелкие травоядные (лемминги, полярные зайцы, полевки и длиннохвостые суслики), которые спасаются от холода в норах, выстланных сухой травой и мхом. Количество их видов невелико, но численность популяций огромна. В районе исследований непереваренные остатки леммингов найдены в отрыжках и погадках всех крупных хищных птиц: полярных сов, короткохвостых поморников, бургомистров и халеев. Старый сухой помет леммингов встречается в тундре повсеместно.

Дикие северные олени *Rangifer tarandus* проводят в тундре только лето, а на зиму мигрируют к югу, к северной границе хвойных лесов. На обследованных территориях в 2015 г. олени нами не встречены, однако повсеместно отмечались их фекалии, как летние, так и зимние (отличаются по фактуре), а также костные останки животных. Судя по опросным сведениям, небольшие группы диких

оленей изредка заходят на территорию газопромыслового участка в зимнее время с Таймыра. В 2016 г. стадо диких оленей было отмечено на северном побережье Ямала, при обследовании акватории Обской губы на выходе в Карское море.

Из хищников в районе исследований постоянно встречаются песцы.

Медленное разложение органических веществ, небольшая мощность почвенного покрова, невысокие темпы прироста растительности, низкий уровень видового разнообразия делают арктическую тундру чрезвычайно уязвимой экосистемой.

3. Характер антропогенного воздействия и современное состояние экосистем исследуемого района

До начала в 2013 г. активных строительных работ по вводу Южно-Тамбейского лицензионного участка основным видом антропогенной деятельности на обследуемой территории было оленеводство. Его стрессовое воздействие на состояние местных экосистем было весьма существенным. Общая численность поголовья домашних оленей на п-ве Ямал составляет в настоящее время около 1 млн голов, стада отдельных сельхозкооперативов достигают численности 2–2,4 тыс. голов. Сильная вытянутость полуострова в меридиональном направлении и, соответственно, разобщенность летних и зимних пастбищ предполагают наличие интенсивных сезонных миграций стад. При этом относительная узость полуострова определяет малые возможности варьирования миграционных путей: стада ежегодно проходят по одним и тем же маршрутам. Из-за этого тундровые растительные сообщества находятся в условиях гиперэксплуатации, не имея даже кратких периодов для восстановления. В результате многие лишайниковые и моховые сообщества находятся в состоянии деградации. К западу от Южно-Тамбейского участка нами наблюдались площади с полностью уничтоженным растительным и дерновым покровом, на которых происходит выветривание грунта. «Стравливание» естественных пастбищ домашними оленями является важнейшей причиной сокращения численности диких оленей.

Необходимо также отметить, что северные олени, будучи всеядными животными, в летний период в массе уничтожают гнезда птиц и молодняк мелких млекопитающих и птиц. В местах прохождения крупных оленьих стад гнезда гусеобразных и тетеревиных птиц, а также куликов уничтожаются полностью.

Охота и рыболовство до 2013 г. не оказывали столь существенного влияния на исследуемые экосистемы и являлись только сопутствующей деятельностью оленеводов, сотрудников метеослужб и пограничной заставы. К охотничье-промысловым видам птиц района исследований относятся белая куропатка, гуси, казарки, речные и нырковые утки, гагары и кулики.

После начала работ по освоению Южно-Тамбейского лицензионного участка на его территории выпас оленей был полностью прекращен. Участок в настоящее время представляет собой сеть небольших строительных площадок, лежащих в 2–4 км друг от друга. На подавляющем большинстве территории газоносного участка плотность расположения этих площадок невелика, а их общая поверхность не превышает 1–1,5 % площади участка.

Крупные сплошные насыпные площади располагаются только в месте строительства порта (около 40 га) и находящегося рядом завода по производству

СГ (60–70 га). Общая численность людей, работающих на лицензионном участке, не превышает 8 тыс. человек. Все они проживают в пос. Сабетта. Отопление и электрогенерация производятся только на природном газе. Поселок и все строительные площадки имеют автономные системы канализации и очистки воды.

При строительстве в обязательном порядке соблюдаются следующие природоохранные мероприятия.

1. Полностью запрещен съезд в тундру колесной и гусеничной техники и ее движение вне дорог общего пользования.
2. Запрещен сход людей со строительных площадок и дорог общего пользования.
3. Запрещены охота, рыбная ловля и сбор ягод (морошки).
4. Запрещено складирование мусора и пищевых отходов вне специально оборудованных контейнеров.
5. Запрещено содержание собак, кошек и других домашних животных.
6. Запрещена подкормка песцов.

Службой охраны организации – пользователя участка (ОАО «Ямал СПГ») ведется постоянный контроль за исполнением этих положений, на нарушителей налагаются крупные денежные штрафы. В весеннее время производится отстрел песцов и бродячих собак, которые изредка отбиваются от оленеводческих стойбищ и появляются на лицензионном участке.

Благодаря вышеперечисленным мероприятиям негативный антропогенный эффект представлен только на небольших локальных участках строительства. На остальных площадях в районе месторождения антропогенное воздействие крайне незначительно и представлено только шумовым загрязнением от транспорта и работающей строительной техники. Как показали наблюдения, птицы очень быстро к нему привыкают.

Фактически строгий режим охраны превратил большую часть тундровых участков в районе месторождения и МП Сабетта в естественные мини-заповедники, которые избавлены от двух главных крупных зол современных тундр: перевыпаса оленей и хищничества собак и песцов. Последние обычно держатся около тех тундровых поселков, где пищевые отходы вываливаются прямо на грунт, а не складируются в недоступные для млекопитающих контейнеры.

В ходе наших наблюдений мохово-осоковые, моховые и осоковые тундры и приморские болота на обследованных участках имели естественный, неугнетенный вид. Состояние участков естественных биотопов в зоне влияния МП Сабетта (участок 3) сходно с состоянием биотопов в зоне сравнения, не затронутой антропогенным воздействием (участки 4–7). Их облик и состояние растительности близки к естественному облику тундровых биотопов в регионах с отсутствующей или крайне слабой хозяйственной деятельностью человека.

4. Общая характеристика орнитофауны

Нами собраны сведения о присутствии в местной фауне 42 видов птиц (табл. 1). Большая часть орнитофауны состояла из видов, имеющих чисто тундровые или преимущественно тундровые ареалы. 32 вида (более трех четвертей состава орнитофауны) могут быть отнесены к водно-болотным птицам и 10 – к птицам

наземных биотопов. Ко второй группе относятся белая куропатка, дербник, мохноногий канюк, перепелятник, полярная сова, белая трясогузка, краснозобый конек, черный дрозд, пуночка и лапландский подорожник.

На миграциях отмечен 31 вид, на гнездовании – 24 вида. У 19 видов отмечены многочисленные летующие особи, 3 вида образовывали линочные скопления. 2 вида отмечены на залетах, 9 видов – на миграциях, гнездовании и летовке, 2 вида – на гнездовании, летовке и линьке, 1 вид – на миграциях, гнездовании и линьке, 5 видов – на миграциях и летовке, 7 видов – на гнездовании и миграциях, 8 видов – только на миграциях, 4 вида – только на гнездовании, 2 вида – только как летующие и еще 2 вида – как залетные.

Таблица 1

Состав орнитофауны и характер пребывания видов

Список видов	Миграции	Гнездование	Летующий	Линька	Залеты
Краснозобая гагара *Gavia stellata*	Обыкн.	Обыкн.	Обыкн.		
Чернозобая гагара *Gavia arctica*	Обыкн.	Мног.	Обыкн.		
Белолобый гусь *Anser albifrons*	Масс.	Ед.		Ед.	
Черная казарка *Branta bernicla*	Мал.				
Шилохвость *Anas acuta*	Обыкн.	Ед.		Ед.	
Свиязь *Anas penelope*	Ед.				
Морская чернеть *Aythya marila*	Обыкн.	Ед.	Мал.	Мал.	
Обыкновенная гага *Somateria mollissima*	Ед.				
Гага-гребенушка *S. spectabilis*		Обыкн.	Обыкн.	Обыкн.	
Сибирская гага *Polisticta stelleri*			Ед.		
Морянка *Clangula hyemalus*		Ед.	Мног.	Мног.	
Белая куропатка *Lagopus lagopus*		Мал.			
Дербник *Falco columbarius*					Ед.
Мохноногий канюк *Buteo lagopus*			Ед.		
Перепелятник *Accipiter nisus*					Ед.
Галстучник *Charadrius hiaticula*	Обыкн.	Масс.			
Тулес *Squatarola squatarola*		Обыкн.			
Камнешарка *Arenaria interpres*	Ед.				
Фифи *Tringa glareola*	Мал.		Мал.		
Щеголь *Tringa erythropus*	Обыкн.				
Бекас *Gallinago gallinago*	Мал.				
Дупель *Gallinago media*	Ед.				
Кулик-воробей *Calidris minima*	Мног.	Мног.			
Белохвостый песочник *C. temminckii*	Мног.	Обыкн.			
Чернозобик *Calidris alpina*	Мног.	Обыкн.			
Дутыш *Calidris melanotos*		Ед.			
Песчанка *Calidris alba*	Ед.				
Турухтан *Philomachus pugnax*	Масс.	Обыкн.			
Круглоносый плавунчик *Phalaropus lobatus*	Масс.	Обыкн.			
Плосконосый плавунчик *Ph. fulicaria*		Мног.			

Окончание табл. 1

Список видов	Миграции	Гнездование	Летующий	Линька	Залеты
Халей *Larus heuglini*	Обыкн.	Обыкн.	Обыкн.		
Бургомистр *Larus hyperboreus*	Мал.		Мал.		
Полярная крачка *Sterna paradisaea*	Обыкн.	Мал.	Обыкн.		
Короткохвостый поморник *Stercorarius parasiticus*	Мал.	Ед.	Мал.		
Длиннохвостый поморник *S. longicaudus*	Ед.	Ед.			
Средний поморник *S. pomarinus*	Ед.		Ед.		
Полярная сова *Nyctea scandiaca*	Мал.		Мал.		
Белая трясогузка *Motacilla alba*	Обыкн.	Обыкн.	Обыкн.		
Краснозобый конек *Anthus cervinus*	Обыкн.	Обыкн.	Обыкн.		
Черный дрозд *Turdus merula*					Ед.
Пуночка *Plectrophenax nivalis*	Обыкн.	Мал.	Обыкн.		
Лапландский подорожник *Calcarius lapponicus*	Мног.	Обыкн.	Мног.		

Примечания: обыкн. – обыкновенный вид, мног. – многочисленный, масс. – массовый, мал. – малочисленный, ед. – единичные особи.

5. Гнездовые сообщества

Ежегодно на территории исследования нами отмечалось до 400 попыток размножения пар 22 видов птиц. Среди гнездившихся птиц доминировали белая трясогузка и галстучник, встречавшиеся на всех участках с незакрепленным песчаным грунтом: морских побережьях, речных отмелях, обочинах дорог и отсыпках поселков и строительных площадок.

Субдоминантами были халей, кулик-воробей, белохвостый песочник, круглоносый плавунчик и полярная крачка. Многочисленны – чернозобик, краснозобый конек, пуночка и лапландский подорожник. Обычны – чернозобая гагара (рис. 3), краснозобая гагара, белолобый гусь, морская чернеть, морянка, гага-гребенушка, белая куропатка, тулес, турухтан.

В годы исследований наблюдался заметный спад численности леммингов, вследствие чего наземные и пернатые хищники переключились на разорение птичьих гнезд и выводков. Несмотря на это, численность гнездовых сообществ птиц была сходной с естественными биотопами тундр, а у отдельных видов даже несколько превышала средние показатели для Ямала в годы с низкой численностью леммингов. Это может быть объяснено двумя причинами:

1. Введение режима охраны территорий порта и прилегающего газопромыслового участка сняло негативное воздействие от перевыпаса домашних оленей. Положительный эффект оказали также регулярный отстрел и отлов песцов, ведущиеся в весеннее время вокруг порта и пос. Сабетта, и сбор пищевых отходов в закрытые контейнеры, не доступные для этих хищников.

2. Появление новых искусственных биотопов в виде песчаных насыпей дорог оказалось весьма привлекательным для ряда видов куликов и воробьиных птиц. Например, на обследованном участке обращает на себя внимание гораздо

Рис. 3. Чернозобая гагара около выводка на озере
в долине р. Салямлекабтамбада-Яха (1 августа 2015 г.) (фото С.А. Коузова)

бóльшая, чем это характерно для естественных биотопов ямальских тундр, численность галстучника, пуночки и белой трясогузки. У этих видов отмечено многократное преобладание гнездящихся птиц на участках 1 и 2, где биотопы антропогенно преобразованы. Галстучника и белую трясогузку сюда привлекают обширные площади кормовых биотопов на искусственных песчаных насыпях. У пуночек в таких ландшафтах появляется большое количество дополнительных гнездовий в щелях построек и укрытиях среди строительного мусора.

Наибольшие гнездовая численность и видовое разнообразие водно-болотных птиц наблюдались на участке 3 в зоне влияния строящихся порта и завода по производству СПГ. Это мы связываем с наличием на этом участке крупного мелководного оз. Явхэвто с изрезанной береговой линией и большими площадями болот по его берегам.

На остальных участках количество гнездящихся видов варьировало незначительно. Численность гнездовых сообществ была заметно выше только на участках 6 и 7, характеризующихся наиболее развитой озерно-болотной сетью.

6. Транзитные миграции

Ежегодно за период наблюдений на транзитном пролете отмечалось свыше 30 тыс. особей 34 видов. Явным доминантом был турухтан. Его наиболее массовые миграции наблюдались в конце 1-й – начале 2-й декады августа, когда только на отмелях у северо-западного берега оз. Явхэвто отмечалось до 2,5–3 тыс. отдыхающих птиц (рис. 4).

Субдоминантами выступали чернозобик (рис. 5), круглоносый плавунчик и лапландский подорожник. Массовыми видами были белолобый гусь (рис. 6), шилохвость, галстучник, кулик-воробей, халей, краснозобый конек; обычными – фифи, белохвостый песочник, бургомистр, полярная крачка, белая трясогузка, пуночка.

Активные послегнездовые и послелиночные миграции всех видов наблюдались в течение всего периода наблюдений. Наибольшее количество птиц летело в первой половине августа с пиком во 2-й его декаде. В конце июля – начале августа пролетела основная масса галстучников, фифи, круглоносых плавунчиков. Остальные виды куликов, шилохвость, чайковые и воробьиные птицы были наиболее многочисленны во 2-й декаде августа. Пролет белолобых гусей в 2015 г., начавшись во 2-й декаде августа, был наиболее интенсивным в последней пятидневке месяца. В 2016 г. в условиях аномально теплой осени в последних числах сентября – начале октября наблюдался последний самый интенсивный пик пролета этого вида.

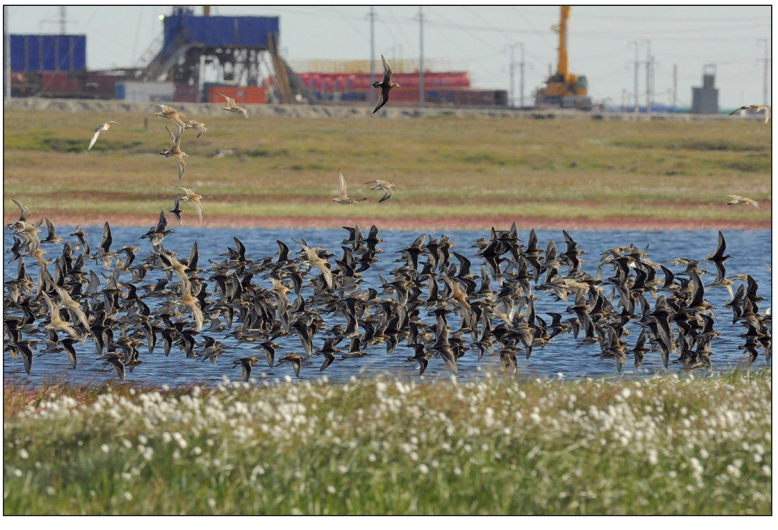

Рис. 4. Массовая миграция турухтанов на озере Явхэвто (10 августа 2015 г.) (фото С.А. Коузова)

Рис. 5. Чернозобики и кулики-воробьи, кормящиеся на хасырее оз. Явхэвто (7 августа 2015 г.) (фото С.А. Коузова)

Рис. 6. Кормящаяся стая гусей в приморской тундре
у устья р. Сабетта-Яха (1 октября 2016 г.) (фото С.А. Коузова)

У белолобых гусей направление пролета было западным, у чайковых – юго-восточным вдоль побережья Обской губы. Все остальные виды летели на восток-юго-восток из внутренних тундр в сторону Обской губы.

7. Миграционные и линочные скопления

Ежегодно нами отмечалось свыше 20 тыс. регистраций особей 40 видов. Доминировал турухтан, субдоминантами в скоплениях были кулик-воробей, чернозобик, круглоносый плавунчик и халей. Массовыми видами были белолобый гусь, шилохвость, морянка, белохвостый песочник, краснозобый конек и лапландский подорожник. Многочисленны – галстучник, бургомистр, полярная крачка, белая трясогузка и пуночка.

Высокая численность миграционных скоплений наблюдалась на всех основных учетах, но максимальные количества птиц отмечены во второй пятидневке августа. В конце июля – начале августа явно доминировал круглоносый плавунчик. В конце первой декады августа доминировал турухтан и отмечались максимальные показатели у большинства других видов куликов. В последней пятидневке августа самыми массовыми видами стали белолобый гусь и шилохвость.

Наибольшая суммарная численность мигрантов отмечена на участке 3, где гуси, утки и кулики в массе держались на оз. Явхэвто. Вторым по массовости скоплений птиц стал участок 7, где огромные массы куликов держались на высохшем ложе озера в русле р. Нохо-Яха, а стаи гусей и уток – на оз. Нямндгэвато. Обращает на себя внимание также более высокая численность мигрантов на участке 1 по сравнению с естественными биотопами остальных участков. Утки в большом количестве здесь наблюдались на озерах в черте пос. Сабетта, кулики – на склонах песчаных насыпей поселка и на отмелях в порту в устье р. Сабетта-Яха, где держалась также основная масса чаек.

На линьке нами ежегодно наблюдалось 250–300 особей линяющих гусеобразных пяти видов. Массовым видом была морянка, остальные птицы были

представлены небольшими группами. Белолобые гуси и шилохвости заканчивали линьку в первой пятидневке августа, морские чернети и гаги-гребенушки – до конца 5-й пятидневки августа. Заметное число нелетных морянок наблюдалось на озерах до самого конца этого месяца. Максимальное число линяющих птиц держалось на оз. Явхэвто на участке 3 в зоне влияния строящегося порта.

Заключение

По результатам мониторинга состояние орнитокомплексов окрестностей порта и пос. Сабетта можно оценить как благополучное. Негативный эффект на орнитофауну отмечен только на участках 1 и 2 – непосредственно на стройках и в зоне складирования. Благодаря грамотному комплексу мер по экологической безопасности на остальных участках с естественными биотопами, находящихся в непосредственной близости от промышленных, транспортных и жилых зон, создан режим своеобразных мини-заповедников. Численность и видовой состав орнитокомплексов в них не ниже, а в некоторых случаях – даже выше, чем на естественных территориях тундры вне газопромысловых участков.

Как водно-болотные птицы, так и виды наземных местообитаний проявили тенденцию к освоению антропогенных биотопов (рис. 7, 8), которые использовались как места гнездования, временные убежища, кормовые столики и т. д. Предотлетные скопления белых куропаток (до 250 особей) в конце лета держались на территории аэропорта около взлетно-посадочных полос, где птицы склевывали гастролиты на песчано-гравийных насыпях.

Есть основания предполагать, что орнитологическая обстановка в исследованном районе в целом лучше, чем в других тундрах Ямала. Однако это предположение должно быть проверено дальнейшими исследованиями.

По результатам проведенного мониторинга по отношению к порту, строящемуся в Заполярье, впервые в мировой научной литературе применено словосочетание «environmentally friendly» («экологически дружественный») [4].

Рис. 7. Кулик фифи, сидящий на проводах электропередачи у пос. Сабетта (29 июля 2015 г.) (фото С.А. Коузова)

Рис. 8. Полярная сова у границ пос. Сабетта (9 августа 2015 г.) (фото С.А. Коузова)

Результаты мониторинга использованы для разработки Стратегии развития «экологически дружественного порта» в условиях Крайнего Севера. Разработанная Стратегия развития экологически дружественного порта для условий Арктики направлена на совмещение возможности развития инфраструктуры МП и здоровой, безопасной среды обитания окружающих территорий и акваторий. В статье использованы результаты наблюдений и фотографии орнитолога экспедиции ООО «Эко-Экспресс-Сервис» С.А. Коузова.

Литература

1. *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.
2. *Брэй Р.Н.* (ред.) Экологические аспекты дреджинга / пер. с англ. – СПб.: РГГМУ, 2013. – 442 с.
3. *Добринский Л.К.* (ред.) Природа Ямала. – Екатеринбург: УИФ Наука, 1995. – 435 с.
4. *Жигульский В.А., Шилин М.Б.* Экологически дружественный порт в Арктике // Арктика: геополитические и политико-экономические проблемы освоения / IX межд. конф. по географии и картографированию океана. – СПб.: Русск. геогр. общество, 2015. – С. 185–190.
5. *Коузов С.А., Шилин М.Б., Чусов А.Н.* Разнообразие и уязвимость орнитофауны восточной части Финского залива в районе морского газопровода «Нордстрим» // Учен. зап. РГГМУ. 2013, № 31. – С. 120–137.
6. *Коузов С.А., Шилин М.Б.* Основные тенденции многолетней динамики сообществ гидрофильных птиц островной зоны восточной части Финского залива // XIV межд. орнитологич. конф. Северной Евразии. – Алматы, 2015. – С. 266–267.
7. *Макеев В.М.* (ред.) Ненецкий автономный округ. Современное состояние и перспективы развития. – СПб.: ГПА, 2005. – 511 с.

8. *Полежаев А.Н.* Растительность Севера Дальнего Востока и ее использование в оленеводстве: автореф. дисс. … д-ра биол. наук. – Екатеринбург, 1993. – 48 с.
9. *Равкин Е.С., Челинцев Н.Г.* Методические рекомендации по комплексному маршрутному учету птиц. – М., 1990. – 93 с.
10. *Федоров М.П., Шилин М.Б., Горбунов Н.Е., Масликов В.И., Ролле Н.Н., Романов М.В. и др.* Экологические основы управления природно-техническими системами. – СПб.: изд-во Политехнич. ун-та, 2007. – 505 с.
11. *Халланаро Э.-Л., Пюльвяняйнен М., Гаврило М.* Природа Северной Европы. – Копенгаген: Совет Министров Северных Стран, 2001. – 351 с.
12. *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.
13. *Шилин М.Б., Голубев Д.А., Леднова Ю.А.* Техносферная безопасность дреджинга. – СПб.: изд-во Политехнич. ун-та, 2010. – 385 с.
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. *Шилин М.Б., Хаймина О.В.* Прикладная морская экология. – СПб.: РГГМУ, 2014. – 86 с.
16. *Шилин М.Б., Чусов А.Н., Жигульский В.А., Коузов С.А.* Водно-болотные птицы в заказнике «Южное побережье Невской губы»: не на птичьих правах! // Окружающая среда Санкт-Петербурга, 2017, № 1 (3). – С. 40–47.
17. *Kumari E.V.* Methods of Study of Visible Bird Migrations / Tartu, 1979. – 29 p.
18. *Shilin M., Chusov A., Lednova J., Kouzov S.* Variety and vulnerability of waterbird community I the eastern part of the Gulf of Finland in the zone of «Nordstream» marine gas pipeline // Baltic Int. Symp. IEEE / OES / Tallinn, 2014. – pp. 1–6.

ПОСВЯЩАЕТСЯ ГОДУ ЭКОЛОГИИ В РОССИИ

В весенне-летний период 2017 г. экологи РГГМУ приняли участие в ряде интересных и важных мероприятий, часть которых сами и организовали.

В рамках IV Всероссийского образовательного слёта юных полярников «Наша планета – 2017», проводившегося 1–5 марта в Санкт-Петербурге на разных площадках, 2 марта в РГГМУ состоялись интеллектуальная игра «Экологический брейн-ринг» и конкурс-презентация экологических сказок «Наша прекрасная планета Земля». В составе жюри указанных мероприятий работали заведующий кафедрой прикладной и системной экологии Д.К. Алексеев и заведующая кафедрой водных биоресурсов и аквакультуры С.В. Королькова. 3 марта состоялась защита исследовательских проектов, посвящённых экологии, изучению природы, животных, водных ресурсов Севера, полярным экспедициям, русским знаменитым путешественникам, открытиям в Арктике, исследователям Антарктиды, экономическим и национальным интересам арктической зоны России, культуре народов Севера (секция «Экология»). В составе жюри конкурса работала С.В. Королькова.

10–21 апреля в РГГМУ прошла уже ставшая традиционной Декада науки университета. В рамках Декады науки на факультетах были организованы мероприятия по следующим категориям.

1. Мероприятия с участием профессорско-преподавательского состава (ППС) и научных сотрудников. В рамках данной группы мероприятий на факультетах были организованы сессии ученых советов (в форме факультетских конференций), проведен ряд семинаров. Всего на факультетах было проведено 17 мероприятий.
2. Мероприятия с участием студентов. В рамках данных мероприятий проводились:

– заседания СНО факультета в форме конференции;
– научные семинары;
– олимпиады студентов по специализации факультета.

Всего на факультетах было проведено 24 мероприятия.

В качестве наиболее крупных необходимо отметить два мероприятия, проведенных экологическим факультетом:

– 1-я Всероссийская молодежная научно-практическая конференция с международным участием «Экогидромет – новые горизонты»;
– 1-я межвузовская научно-практическая студенческая конференция «Вопросы развития аквакультуры».

Организаторами конференции «Экогидромет – новые горизонты» выступили сотрудники кафедры прикладной и системной экологии Д.К. Алексеев, Н.В. Зуева

и Е.С. Урусова. Задача конференции заключалась в создании площадки для обмена опытом в области решения современных экологических проблем между молодыми учеными, специалистами, аспирантами и студентами в возрасте до 35 лет. Основные направления работы конференции: обеспечение экологической и гидрометеорологической безопасности, актуальные вопросы современного природопользования, оценка качества окружающей среды урбанизированных территорий, биологические методы оценки окружающей среды. С пленарными докладами выступили молодые ученые: Ю.А. Зуев (РГГМУ) – «Мегабентос бухты Нелла (море Содружеств, Антарктида)», Е.С. Урусова (РГГМУ) – «Вопросы применения методов статистической обработки данных гидрохимических наблюдений», К.К. Горин (Государственное бюджетное учреждение дополнительного образования «Дом детского юношеского творчества Выборгского района») – «Структурные особенности сообществ цианопрокариот в прибрежных биотопах Невской губы Финского залива». Всего в работе конференции приняли участие 80 делегатов из различных образовательных и научно-исследовательских университетов и организаций Санкт-Петербурга, Москвы, Вологды, Пскова, Ярославля, а также Могилева (Республика Беларусь).

1-я межвузовская научно-практическая студенческая конференция «Вопросы развития аквакультуры» открывает цикл ежегодных конференций, которые планируется проводить под эгидой Северо-Западного филиала ФГБУ «Главное бассейновое управление по рыболовству и сохранению водных биологических ресурсов» на площадках учебных заведений Санкт-Петербурга, осуществляющих подготовку по направлению «Водные биоресурсы и аквакультура» (Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербургская государственная академия ветеринарной медицины, Санкт-Петербургский морской рыбопромышленный колледж). На 1-й конференции были рассмотрены основные вопросы аквакультуры в Северо-Западном регионе России – воспроизводство водных биоресурсов в естественных и искусственных условиях, актуальные вопросы ихтиопатологии. Ответственным секретарем конференции была С.В. Королькова.

В качестве завершающего мероприятия Декады науки была проведена итоговая научная конференция РГГМУ, на которой были заслушаны доклады ведущих ученых РГГМУ и представителей студенческого научного общества университета. В работе итоговой научной конференции приняло участие более 100 человек из числа ППС и студентов. Победители и призеры секций СНО на факультетах получили грамоты победителей и призеров. Метеорологический, гидрологический и экологический факультеты наградили дополнительно грамотами и поощрительными призами своих лучших студентов. Победители СНО выдвинуты от РГГМУ в качестве кандидатов на участие в ежегодном Всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего – наука молодых».

В рамках Декады науки РГГМУ кафедра химии природной среды провела научный семинар «Немирные достижения химии: история, прогресс, экологические проблемы». Семинар провел канд. хим. наук А.И. Степанов, рассказавший собравшейся аудитории о сложных научно-экологических и морально-этических проблемах, которые приходится решать ученым-химикам в современном мире (фото 1).

Фото 1. Семинар «Немирные достижения химии: история, прогресс, экологические проблемы» собрал полную аудиторию. Самыми заинтересованными слушателями были, конечно же, студенты

В это же время в Москве в Российском государственном социальном университете состоялась Всероссийская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития», организованная Институтом глобального климата и экологии Росгидромета и РАН при участии лаборатории антропогенных изменений климатической системы Института географии РАН. Конференция собрала более 200 участников из профильных научно-исследовательских учреждений и вузов со всей страны, а также из-за рубежа. Сотрудники кафедры экологии и биоресурсов РГГМУ представили доклады по актуальным темам: «Климатические изменения, устойчивость морских экосистем и проблемы организации экологического мониторинга межрегионального судоходства» (доцент В.В. Дроздов, фото 2), «Климатические изменения в Арктике, современные особенности и перспективы тенденции освоения ресурсов шельфа

Фото 2. Доцент В.В. Дроздов представляет доклад «Климатические изменения, устойчивость морских экосистем и проблемы организации экологического мониторинга межрегионального судоходства»

и проблемы организации экологического мониторинга в ледовых условиях» (старший преподаватель А.В. Косенко), «Организация сети дистанционного мониторинга разливов нефти и нефтепродуктов на акваториях Санкт-Петербурга – принципы и технические средства» (доцент В.В. Дроздов, инженер ООО «Эко-Экспресс-Сервис» В.Ю. Эйсмонт – выпускник кафедры 2015 г.).

18 мая компания «Нордстрим-2» провела Круглый стол, посвященный обсуждению вопросов выбора оптимального маршрута трассы новой ветки морского газотрубопровода (фото 3).

Компания «Нордстрим-2» приветствует дебаты по поводу ключевых вопросов проекта и стремится поддерживать открытый диалог с заинтересованными сторонами на всех этапах развития проекта. За Круглым столом собралось 30 экспертов, представляющих компанию «Нордстрим-2», Российскую академию наук, фирмы «Газпром Проектирование», «Эко-Экспресс-Сервис» и «ФРЕКОМ», коалицию «Чистая Балтика», российский Фонд дикой природы (WWF), Балтийский фонд природы, «Гринпис» и др. От РГГМУ за Круглым столом присутствовал заведующий кафедрой экологии и биоресурсов профессор М.Б. Шилин, проводившей независимую экспертизу научно-технических отчетов, в которых обосновывался выбор оптимального варианта трассы (фото 4).

Эксперты Круглого стола подтвердили высокий уровень проведенных исследований, результаты которых положены в основу обоснования выбора оптимального варианта трассы.

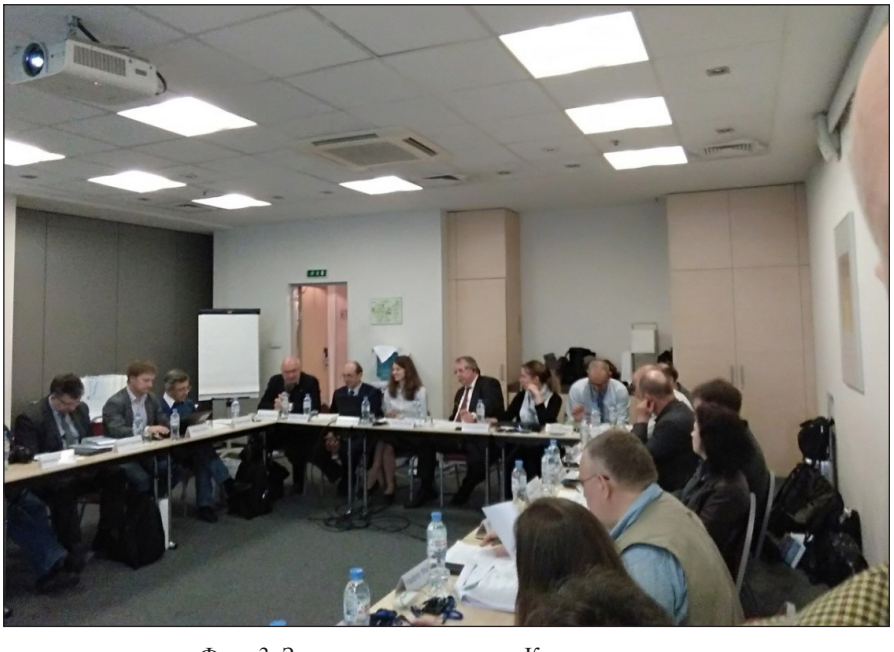

Фото 3. Заседание экспертов за Круглым столом
по вопросам выбора оптимального маршрута газотрубопровода «Нордстрим-2»

Фото 4. Обсуждение докладов экспертов

Предлагаемая трасса морского газотрубопровода должна в полной мере учесть интересы, с одной стороны, многочисленных природопользователей, а с другой – морских птиц, рыб, тюленей и прочих обитателей восточной части Финского залива.

Научно-методическое пособие «Экологические аспекты дреджинга», выпущенное в 2008 г. Центральной европейской дреджинговой ассоциацией (ЦЕДА), переведенное в 2009–2011 гг. экспертами РГГМУ на русский язык и изданное в Санкт-Петербурге в 2013 г., готовится к переизданию в новой редакции. В начале лета 2017 г. профессор РГГМУ М.Б. Шилин получил приглашение участвовать в рабочей встрече Экологической комиссии ЦЕДА в Брюсселе, где был рассмотрен макет обновленного пособия (фото 5, слева).

Предполагается, что новое издание выйдет под названием «Дреджинг для устойчивого развития» и будет состоять из 8 разделов, посвященных развитию береговой инфраструктуры, экологически безопасным технологиям осуществления дреджинговых операций, компенсационным мероприятиям, оптимизации программ мониторинга, оценке социально-экономических эффектов дреджинга и т. д. В работе Экологической комиссии приняли участие 62 эксперта из 10 европейских стран (Австрии, Бельгии, Великобритании, Голландии, Дании, Испании, Норвегии, Польши, Португалии, России и Франции), а также из Австралии и Соединенных Штатов Америки (фото 5, справа).

В качестве примеров наиболее удачных дреджинговых проектов в текст пособия будут включены «боксы», подготовленные экспертами разных стран. По результатам жарких дискуссий (фото 6) в качестве боксов для пособия были отобраны, в том числе, наработки сотрудников РГГМУ – профессоров М.Б. Шилина,

Фото 5. Заседание рабочей группы ЦЕДА по переизданию научно-методического пособия «Экологические аспекты дреджинга». Брюссель, отель «Краун Плаза»

Фото 6. Обсуждение «боксов» для включения в текст научно-методического пособия

В.А. Жигульского и доцента А.А. Ершовой, рассмотревших в качестве успешных дреджинговых проектов строительство морских портов Сабетта и Бронка, а также возведение на искусственно намытой территории в Невской губе «башни» МФК «Лахта Центра».

1–2 июня в Шлиссельбурге состоялось очередное заседание бассейновых советов Балтийского и Баренцево-Беломорского бассейновых округов Невско-Ладожского бассейно-водного управления (БВУ), в работе которых приняли участие С.В. Королькова и А.Б. Степанова. Основная тема заседания советов – экологическое состояние водных объектов, вопросы их охраны, определение границ водных объектов, проект федерального закона Российской федерации «О Ладожском озере».

12–16 июня старый северо-немецкий город Росток (фото 7) принял 11-й конгресс ученых стран Балтийского региона – Baltic Sea Science Congress – 2017 (далее – Конгресс). Конгресс проводится один раз в два года и является важным событием в научном мире циркумбалтийских стран, собирая специалистов в области

Фото 7. Старый центр Ростока. Вид с колокольни кирхи Св. Николая (фото А. Ершовой)

экологии, океанологии, морской геологии и гидротехнического строительства. В разные годы Конгресс принимали Таллинн, Рига, Клайпеда, Санкт-Петербург и др.

На этот раз Конгресс прошел на базе Ростокского университета и Института исследований Балтийского моря им. Лейбница (г. Варнемюнде) и собрал более 300 участников, представлявших все страны Балтийского региона, а также США, Великобританию, Ирландию и Голландию. Конгресс открыл ректор Ростокского университета профессор д-р Вольфганг Шарек (фото 8).

Фото 8. Ректор Ростокского университета профессор д-р Вольфганг Шарек открывает Конгресс

Фото 9. Участников Конгресса приветствует
директор Института исследований Балтийского моря профессор д-р Ульрих Батман

С приветствием к участникам Конгресса обратился также директор Института исследований Балтийского моря (г. Варнемюнде) профессор д-р Ульрих Батман (фото 9).

Научную часть Конгресса открыл пленарный доклад Мартина Фисбека «Будущее океанов – вызовы и возможности для человечества». В последующих пленарных докладах были рассмотрены вопросы эвтрофирования прибрежных вод, возникновения в водной среде гипоксийных условий, влияния потепления климата на «цветение» сине-зеленых водорослей, воздействия затоков вод Северного моря на структуру водной толщи Балтийского моря, сохранения биологического и геологического разнообразия морских экосистем. Ежедневно в течение пяти дней работы Конгресса одновременно проводились четыре научных сессии, по окончании которых устраивались межсекционные дискуссии и круглые столы. От РГГМУ в Конгрессе приняли участие заведующая кафедрой промысловой океанологии и охраны природных вод Т.Р. Еремина и доцент кафедры экологии и биоресурсов А.А. Ершова (фото 10).

Фото 10. Доцент кафедры экологии и биоресурсов А.А. Ершова представляет стендовый доклад «Строительство зданий-символов на намывных территориях: может ли оно быть устойчивым?» (в соавторстве с М.Б. Шилиным и В.А. Жигульским)

29 июня в рамках выставки дипломных проектов «Студенты – городу – 2017» состоялось награждение победителей ежегодного конкурса на соискание премий правительства Санкт-Петербурга за выполнение дипломных проектов по заданию исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга. От РГГМУ победителями стали студенты экологического факультета Виктория Серова (руководитель – канд. хим. наук И.В. Розенкова) и Наталья Мороз (руководитель – старший преподаватель Н.Б. Глушковская), выполнявшие дипломные проекты по заданию Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга.

В рамках общеевропейского образовательного проекта «Эразмус +» заведующий кафедрой прикладной и системной экологии Д.К. Алексеев и профессор М.Б. Шилин 7 июля встретились с директором международного отдела Йенского университета (Германия) Штефани Ватерштрадт. На встрече были обсуждены как основные результаты, так и перспективы дальнейшего сотрудничества РГГМУ с Йенским университетом. По результатам сотрудничества 2016–2017 гг. к настоящему времени опубликован ряд статей в журнале «Ученые записки РГГМУ».

Студент 2-го курса магистратуры экологического факультета (профиль «Экологическая безопасность северных регионов») Р.Д. Востриков в июле принял участие в экспедиции на о. Вилькицкого в рамках выполнения научно-исследовательских работ по теме «Выявление и инвентаризация объектов накопленного экологического ущерба на острове Вилькицкого» с организацией «Некоммерческое партнерство "Российский Центр освоения Арктики"» (руководитель проекта – заведующий кафедрой природопользования и устойчивого развития полярных областей профессор В.М. Макеев) (фото 11).

Фото 11. Участники экспедиции на о. Вилькицкого

С 31 июля по 5 августа в г. Лонгйир – административном центре норвежской провинции Свальбард (архипелаг Шпицберген) – проходила Летняя школа для аспирантов и магистров. В работе школы принял участие Д.К. Алексеев, который прочитал молодым исследователям лекции, а также провел семинары, отражающие современные подходы России к изучению проблем Арктического региона.

Сотрудники эколого-аналитической лаборатории РГГМУ (заведующая лабораторией Е.Н. Романова, инженер К.А. Журкина) совместно с выпускником океанологического факультета Ю.А. Татаренко в августе приняли участие в работах по химико-аналитическому исследованию проб воды из Черного моря и проб сточных вод, образующихся при гидроиспытаниях трубопровода «Южный поток» (South Stream), проводимых в рамках договора по выполнению наблюдений за качеством вод Черного моря в районе строительства газопровода.

Научно-практический проект РГГМУ стал одним из шести проектов петербургских научных коллективов – победителей конкурса Президентской программы по поддержке лабораторий мирового уровня (см. «Санкт-Петербургские ведомости», 2.08.2017 г.). Программа была разработана Российским научным фондом, и всего по России заявку на участие в этом престижном состязании подавали более 400 лабораторий. Президентский грант в итоге получил 41 научный коллектив. В РГГМУ руководство проектом осуществляет признанный в мире французский эксперт по эксплуатации морских ресурсов Бертран Шапрон. «Мы изучаем меняющуюся арктическую систему "морской лед – атмосфера", используя данные спутниковых измерений и компьютерного моделирования, – поясняет Дмитрий Шилов, сотрудник лаборатории спутниковой океанографии. – Для чего? Чтобы точнее прогнозировать сложные погодные явления в этой системе – штормовые ветры, ливни, высокие волны – и вести мониторинг на основе микроволновых (устойчивых к экстремальным условиям) и других современных методов. И, в конечном счете создавать безопасные условия работы на Северном морском пути, арктическом шельфе».

В Год экологии исполняется 25 лет компании «Эко-Экспресс-Сервис», возглавляемой профессором кафедры экологии и биоресурсов В.А. Жигульским. За время своего существования компания реализовала более 3 тыс. проектных и экологических работ. В последние несколько лет компания осуществляла процедуру ОВОС для таких крупных гидротехнических проектов, как морские портовые комплексы Сабетта (Обская губа) и Бронка (Невская губа). Компания разработала и установила под ключ очистные сооружения для порта Сабетта, а также для Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений на всем протяжении дамбы от пос. Горская через Кронштадт до Ломоносова. Ежегодно в компании проходят практику до 20 студентов факультета экологии РГГМУ. Выпускники РГГМУ работают в компании «Эко-Экспресс-Сервис» в отделах мониторинга и проектных изысканий.

Список авторов

Аладин Николай Васильевич, д-р биол. наук, гл. науч. сотр., Зоологический институт РАН, nikolai.aladin@zin.ru.

Архипов Александр Геральдович, д-р биол. наук, доцент, зам. директора АтлантНИРО, arkhipov@atlantniro.ru.

Бандурин Константин Викторович, канд. биол. наук, директор АтлантНИРО, bandurin@atlantniro.ru.

Блиновская Яна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор каф. безопасности в чрезвычайных ситуациях и защиты окружающей среды Инженерной школы ДВФУ, г. Владивосток, blinovskaya@hotmail.com.

Бубнова Екатерина Сергеевна, мл. науч. сотр. лаб. геоэкологии Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, bubnova.kat@gmail.com.

Владимиров Максим Викторович, д-р геол.-минер. наук, зам. полномочного представителя Президента РФ в Северо-Кавказском федеральном округе, Администрация Президента Российской Федерации, vladimirov_mv@gov.ru.

Глушковская Наталья Борисовна, ст. препод. каф. экологии и биоресурсов РГГМУ, glushka@rshu.ru.

Голохваст Кирилл Сергеевич, д-р биол. наук, профессор каф. безопасности в техносфере Инженерной школы ДВФУ, г. Владивосток, droopy@mail.ru.

Гриценко Владимир Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. географии океана Балтийского федерального университета им. И. Канта, gritsenko_vl@mail.ru.

Демин Александр Павлович, д-р геогр. наук, вед. науч. сотр., Институт водных проблем РАН, deminap@mail.ru.

Дмитриев Василий Васильевич, д-р геогр. наук, профессор каф. гидрологии суши СПбГУ, профессор каф. прикладной и системной экологии РГГМУ, vasiliy-dmitriev@rambler.ru.

Добровольский Сергей Гавриилович, д-р геогр. наук, зав. лаб. ИВП РАН, sgdo@bk.ru.

Донченко Владислав Константинович, д-р экон. наук, профессор, директор Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН, v.donchenko@spbu.ru.

Доронин Александр Павлович, д-р техн. наук, профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, doronin52@mail.ru.

Егоров Александр Николаевич, д-р геогр. наук, вед. науч. сотр., Институт озероведения РАН, alex6-1@mail.ru.

Ермаханов Зауалхан Кенжегалиевич, директор Аральского филиала Казахского научно-исследовательского института рыбного хозяйства, г. Аральск, Казахстан, aralnpcrh@mail.ru.

Жигульский Владимир Александрович, канд. техн. наук, директор ООО «Эко-Экспресс-Сервис», dir@ecoexp.ru.

Жоллибеков Бердияр Бахтиярович, канд. с.-х. наук, Институт биоэкологии, г. Нукус, Узбекистан, beckuzb@gmail.com.

Заносов Олег Юрьевич, канд. техн. наук, Управление безопасности людей на водных объектах МЧС РФ, sinus451-89@yandex.ru.

Истомина Мария Николаевна, канд. геогр. наук, науч. сотр. ИВП РАН, mari-istomina@yandex.ru.

Капустина Мария Владимировна, мл. науч. сотр. лаб. геоэкологии Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, kapustina.mariya@yandex.ru.

Кийко Ольга Алексеевна, канд. биол. наук, ведущий специалист Агентства экологического консалтинга и природоохранного проектирования ЗАО «Экопроект», kiyko@bk.ru.

Кирьянов Алексей Валерьевич, начальник управления развитием Инженерной школы ДВФУ, г. Владивосток, droopy@mail.ru.

Козлов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, доцент, зав. лаб. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, kozlov6391@gmail.com.

Кондратьев Сергей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, зам. директора Института озероведения РАН, kondratyev@limno.org.ru.

Котенев Борис Николаевич, канд. геогр. наук, зав. лаб. климатических основ биопродуктивности Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, vvmaslen@vniro.ru.

Крето Жан-Франсуа (Cretaux Jean-Francois), PhD, LEGOS/CNES, г. Тулуза, Франция, Jean-Francois.Cretaux@legos.obs-mip.fr.

Кречик Виктор Антонович, инженер-исследователь лаб. геоэкологии Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, myemail.gav@gmail.com.

Кровнин Андрей Сергеевич, ст. науч. сотр., Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, akrovnin@vniro.ru.

Крюков Леонид Николаевич, д-р хим. наук, гл. науч. сотр. Институт озероведения РАН, kryukovln@yandex.ru.

Лебедев Алексей Анатольевич, начальник учебно-военного центра ДВФУ, г. Владивосток, droopy@mail.ru.

Малинин Валерий Николаевич, д-р геогр. наук, профессор каф. ПО МОК ЮНЕСКО и ОПС РГГМУ, malinin@rshu.ru.

Масленников Вячеслав Вячеславович, д-р геогр. наук, гл. науч. сотр., Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, vvmaslen@vniro.ru.

Мельникова Ирина Николаевна, д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий специалист ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности», irina.melno@yandex.ru.

Меншуткин Владимир Васильевич, д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотр. Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН, menshutkina.n@gmail.com.

Миклин Филип (Micklin Philip), профессор Западно-Мичиганского университета, г. Каламазу, США, Emeritus Professor of Geography, philip.micklin@wmich.edu.

Мордасова Наталья Вадимовна, канд. хим. наук, вед. науч. сотр., Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, vvmaslen@vniro.ru.

Мурый Георгий Петрович, науч. сотр., Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, moury@vniro.ru.

Огурцов Александр Николаевич, инженер-исследователь Института наук о Земле СПбГУ, aogurcov@yandex.ru.

Пасечкина Виктория Юрьевна, инженер ИВП РАН, pase4kina21@yandex.ru.

Петров Кирилл Михайлович, д-р геогр. наук, профессор, Институт наук о Земле СПбГУ, k.petrov@spbu.ru.

Петроченко Вячеслав Михайлович, канд. техн. наук, доцент каф. технологий и средств геофизического обеспечения Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, vmpetrochenko@mail.ru.

Пикула Константин Сергеевич, аспирант каф. нефтегазового дела и нефтехимии Инженерной школы ДВФУ, г. Владивосток, droopy@mail.ru.

Плотников Игорь Светозарович, канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Зоологический институт РАН, igor.plotnikov@zin.ru.

Погребов Владимир Борисович, д-р биол. наук, гл. специалист Агентства экологического консалтинга и природоохранного проектирования ЗАО «Экопроект».

Позднякова Наталья Александровна, ст. препод., СПбГУ, qlnat@mail.ru.

Пчелинцев Василий Геннадьевич, гл. специалист Агентства экологического консалтинга и природоохранного проектирования ЗАО «Экопроект», apis@ecopro.spb.ru.

Румянцев Владислав Александрович, д-р геогр. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель Института озероведения РАН, rum.ran@mail.ru.

Рыбакин Владимир Николаевич, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. физических методов исследований Института озероведения РАН, v.n.rybakin@gmail.com.

Самуленков Дмитрий Альбертович, директор ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности», dmitriy.samulenkov@spbu.ru.

Сапунов Максим Викторович, инженер ресурсного центра «Обсерватория экологической безопасности», maxim.sapunov@spbu.ru.

Снопова Екатерина Михайловна, канд. геол.-минер. наук, зам. директора ООО НП «ЦИТ», snopova-katya@mail.ru.

Тихонова Ольга Анатольевна, аспирант школы естественных наук ДВФУ, г. Владивосток, oldoha@mail.ru.

Токарев Игорь Владимирович, канд. геол.-минер. наук, ведущий специалист РЦ «Геомодель» научного парка СПбГУ, tokarevigor@gmail.com.
Филатов Николай Николаевич, д-р геогр. наук, профессор, чл.-корр. РАН, советник РАН, гл. науч. сотр. Института водных проблем Севера РАН, nfilatov@nwpi.krc.karelia.ru.
Холмянский Михаил Аркадьевич, д-р геол.-минер. наук, профессор, директор ООО НП «ЦИТ», holm936@rambler.ru.
Христофорова Надежда Константиновна, д-р биол. наук, профессор каф. экологии школы естественных наук ДВФУ, г. Владивосток, oldoha@mail.ru.
Царькова Наталья Сергеевна, канд. геогр. наук, начальник отдела мониторинга и работы с природопользователями ООО «Эко-Экспресс-Сервис», carkova@ecoexp.ru.
Чаадаева Елена Витальевна, канд. биол. наук, науч. сотр., Агентство экологического консалтинга и природоохранного проектирования ЗАО «Экопроект», elena.chaadaeva@mail.ru.
Чайка Владимир Викторович, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. центра нанотехнологий Инженерной школы ДВФУ, г. Владивосток, droopy@mail.ru.
Чернова Наталья Владимировна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Зоологический институт РАН, nchernova@mail.ru.
Чида Тэцуро (Chida Tetsuro), доцент, Slavic-Eurasian Research Center, Hokkaido University, Япония, tetsuroch@gmail.com.
Шевченко Владимир Петрович, канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотр. Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, droopy@mail.ru.
Шилин Михаил Борисович, д-р геогр. наук, зав. каф. экологии и биоресурсов РГГМУ, shilin@rshu.ru.
Шмакова Мария Валентиновна, канд. техн. наук, науч. сотр. Института озероведения РАН, m-shmakova@yandex.ru.

Условия публикации в журнале «Ученые записки РГГМУ»

1. Общая информация

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

• 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 7.02.2007 г.

• Для издания принимаются только ранее не опубликованные авторские материалы – научные (практические) статьи, обзоры (обзорные статьи), рецензии, соответствующие тематике журнала.

Основные требования к содержанию авторских материалов

− ***Научная (практическая) статья.*** Во вводной части должны быть обоснованы актуальность и целесообразность разработки темы (научной проблемы или задачи). В основной части статьи путем анализа и синтеза информации необходимо раскрыть исследуемые проблемы, пути их решения, обоснования возможных результатов, их достоверность. В заключительной части – подвести итог, сформулировать выводы, рекомендации, указать возможные направления дальнейших исследований.

− ***Обзор (обзорная статья).*** В обзоре должны быть проанализированы, сопоставлены и выявлены наиболее важные и перспективные направления развития науки (практики), ее отдельных видов деятельности, явлений, событий и пр. Материал должен носить проблемный характер, демонстрировать противоречивые взгляды на развитие научных (практических) знаний, содержать выводы, обобщения, сводные данные.

− ***Рецензия на монографию, учебник*** – анализ, критический разбор, оценка научного произведения (кроме диссертационных исследований) в жанре газетно-журнальной публицистики. Заглавие рецензии допускается заменять библиографическим описанием рецензируемого произведения. Библиографическое описание оформляется согласно ГОСТ 7.1–2003.

− ***Рецензия на научную статью*** – отзыв на научную работу перед ее публикацией. Рецензия должна раскрывать актуальность, значимость, научно-теоретическую методологическую и практическую ценность статьи, содержать оценку, характеристику работы, выводы.

2. Порядок предоставления рукописей

• Объем статьи может составлять до 1,5 авторских листов (1 авт. л. равен 40 тыс. знаков с пробелами), в исключительных случаях, по решению редколлегии, – до 2 авт. л.

• Рукопись должна быть предоставлена в напечатанном виде, а также в виде файла в формате MS Word.

• При наличии иллюстраций они должны быть включены в текст статьи, а также предоставлены в отдельных графических файлах, поименованых таким образом, чтобы было понятно, к какой статье они принадлежат и каким по порядку рисунком статьи они являются.

• Вместе с рукописью автор должен предоставить:

  − подписанный Договор на право использования научного произведения в журнале «Ученые записки РГГМУ», издателем (учредителем) которого является ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ);

  − анкету/ты (сведения об авторе/соавторах) для автора и всех соавторов;

  − справку с места учебы (для студентов и очных аспирантов).

• Материалы можно направлять:

  − почтой (заказным письмом или бандеролью) по адресу: 192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, редколлегия журнала «Ученые записки РГГМУ»;

  − обязательно электронной почтой (e-mail): rio@rshu.ru.

• Все статьи, направляемые авторами для публикации в журналах, рецензируются согласно Положению о рецензировании научных статей в журнале «Ученые записки РГГМУ».

3. Требования к оформлению рукописей

• Инициалы и фамилии авторов, название, аннотация, ключевые слова пишутся на русском и английском языках.

• Аннотация/резюме статьи (на русском и английском языках) объемом 5–6 предложений должна отражать тему, цель публикации и предмет изложения и может начинаться со слов «данная статья посвящена …», «в статье рассматривается…», «статья представляет собой анализ…» и т. п. Далее необходимо охарактеризовать полученный научный результат, например: «Показано…», «Установлено…», «Выявлено…» и т. п., а также описать область использования предмета публикации. В конце аннотации приводятся ключевые слова. Аннотация статьи не должна содержать ссылки на разделы, формулы, рисунки, номера цитируемой литературы.
• Статья должна иметь четкую структуру: введение (обязательно), исходные материалы и методы исследований (если в этом есть необходимость), основную часть (обязательно с описанием полученных результатов, можно несколько подразделов), обсуждение результатов (желательно), заключение (обязательно, с описанием научной новизны).
• Пронумерованный список литературы (в алфавитном порядке, сначала на русском, затем на иностранных языках и в конце электронные ресурсы) приводится в конце статьи с обязательным указанием следующих данных: для книг – фамилия и инициалы автора (редактора), название книги, место издания (город, издательство), год издания; для журнальных статей – фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, выпуск, страницы. Разрешается делать ссылки на электронные публикации и адреса Интернета с указанием всех данных, в том числе даты обращения.
• 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.
• Библиографические ссылки даются в квадратных скобках в виде порядкового номера источника в библиографическом списке. Если при цитировании делается ссылка на конкретную цитату, формулу, теорему и т. п., следует указывать номер страницы, например: [13, с. 23].
• Сноски помещаются на соответствующей странице текста.
• 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.
• Рисунки и таблицы располагаются по тексту в соответствии со ссылкой.
• Все рисунки и таблицы должны быть пронумерованы и озаглавлены. Текст подписи рисунка помещается под рисунком, номер и название таблицы – над таблицей. В случае если рисунок состоит из двух фрагментов и более, сначала дается общее название всему рисунку, а затем объясняется содержание каждого фрагмента (*а, б, в*).
• При постановке значка градуса используется специальный символ, а не буква «о» или ноль в верхнем регистре.
• Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Math Type или вручную в Word.
• В качестве разделителя между целой и дробными частями числа в тексте на руссском языке используется запятая (не точка!).
• Авторская правка в верстке – компенсационная, до пяти буквенных исправлений на странице.

4. Рекомендации по форматированию для подачи рукописи в редакционно-издательский отдел

• Формат: А4 (21×29,7 см) книжный.
• Поля: левое – 2 см, верхнее, правое – 1,5 см; нижнее – 2 см.
• Колонтитулы: от края до верхнего – 0 см; до нижнего – 0,5 см.
• Номер страницы: внизу по центру, шрифт TimesNewRoman, 14.
• Междустрочный интервал – одинарный.
• Абзацный отступ – 0,75 см.
• Выравнивание – по ширине.
• Шрифт – Times New Roman, 14 (основной текст); Times New Roman, 12 (табличный текст, подрисуночная подпись, библиографический список, сноски).
• В формулах русские буквы набирать прямым шрифтом, латинские – курсивным, греческие – прямым, тригонометрические функции (sin, cos и др.) – прямым.

5. Статьи, направленные в редакцию без выполнения требований настоящих условий публикации, не рассматриваются. В случае отклонения статьи редколлегия журнала направляет автору мотивированный отказ.

Н А У Ч Н О Е И З Д А Н И Е

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 48

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Начальник РИО Н.И. Афанасьева
Редактор Л.Ю. Киреева
Технический редактор М.В. Иванова
Корректор О.М. Федотова

Подписано в печать 29.09.17. Формат 70×100 $^{1}/_{16}$. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 25,35. Тираж 500 экз. Заказ № 626.
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

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