



ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ИЗУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

(школа-практика)

**Материалы VI Международной конференции
молодых ученых**

1–5 сентября 2020 г., Петрозаводск

WATER RESOURCES: RESEARCH AND MANAGEMENT

(School and Workshop)

**Proceedings of the 6th International
Young Scientists Conference**

September 1–5, 2020, Petrozavodsk

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ:
ИЗУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ
(школа-практика)**

Материалы VI Международной конференции
молодых ученых

1–5 сентября 2020 г., Петрозаводск

**WATER RESOURCES:
RESEARCH AND MANAGEMENT
(School and Workshop)**

Proceedings of the 6th International
Young Scientists Conference

September 1–5, 2020, Petrozavodsk

Петрозаводск
2020

УДК 556.55:001.891-057.4(063)
ББК 26.222.6
В62

Р е ц е н з е н т ы

д.г.н., чл.-корр. РАН **Н. Н. Филатов**, ИВПС КарНЦ РАН
к.г.н. **М. С. Потахин**, ИВПС КарНЦ РАН
к.г.н. **А. В. Толстик**, ИВПС КарНЦ РАН
к.б.н. **Л. А. Беличева**, Карельский филиал ФГБУН «ВНИРО»
к.х.н. **А. В. Рыжаков**, ИВПС КарНЦ РАН
к.ф.-м.н. **М. К. Чебанова**, ИВП РАН
к.х.н. **Н. Е. Галахина**, ИВПС КарНЦ РАН

Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика). Материалы VI Международной конференции молодых ученых, 1–5 сентября 2020 г., Петрозаводск / отв. ред. Н. Е. Галахина, А. В. Толстик, Т. И. Регеранд. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2020. – 190 с.

ISBN 978-5-9274-0884-9

Представлены результаты исследований молодых ученых по направлениям: география и гидрология, гидрофизика, гидробиология, гидрохимия, донные отложения континентальных водоемов. ИВПС КарНЦ РАН имеет многолетний опыт проведения международной молодежной конференции «Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика)». Однако в 2020 году опыт значительно расширяется: возникла необходимость изменения формата и ввода удаленного участия с использованием интернета в связи с событием, которое существенным образом повлияло на жизнь человечества – пандемия, связанная с распространением коронавируса COVID-19.

Необходимо отметить, что в этой непростой ситуации молодые ученые проявили активную общественную позицию и подготовили результаты своих исследований в виде статей, представленных в данном сборнике, так и выступлений в он-лайн режиме.

Мероприятие направлено на усиление взаимодействия талантливой молодежи в сфере науки и образования при тесном сотрудничестве с отечественными и зарубежными учреждениями высшего образования и научными организациями.

УДК 556.55:001.891-057.4(063)
ББК 26.222.6

Water Resources: Research and Management (School and Workshop). Proceedings of the 6th International Young Scientists Conference, September 1–5, 2020, Petrozavodsk / ed. N. E. Galakhina, A. V. Tolstikov, T. I. Regerand. – Petrozavodsk : KRC RAS, 2020. – 190 p.

The Proceedings of the Conference provide an overview of most of contemporary research of young scientists on issues associated with hydrology, hydrophysics, hydrobiology, hydrochemistry, geography, bottom sediments of continental water bodies. NWPI has many years of experience in organization of International Young Scientists Conference “Water Resources: Research and Management (School and Workshop)”. However in 2020 it was significantly expended as a result of the necessity to change the format and introduction of the remote participation using the Internet in connection with the occasion that had the significant impact on the life of humanity – the pandemic connected with the spread of the coronavirus COVID-19.

It should be noted that in this difficult situation young scientists have shown an active public position and prepared the results of their research work in the form of articles presented in this Proceedings as well as on-line mode presentations.

The event is initiated as an open forum for researchers working on different topics of water resources and to promote interactions among talented young people in the sphere of science and education in close cooperation with domestic and foreign institutions of higher education and research organizations.

Проведение VI Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика)» и издание материалов осуществляются при финансовой поддержке РФФИ (№ 20-05-22041)

ISBN 978-5-9274-0884-9

© Авторы статей, 2020
© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2020
© ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Предисловие (Филатов Н. Н.)</i>	7
<i>Белкина Н. А.</i> Изучение современного седиментационного режима водоемов гумидной зоны (на примере озер Карелии)	9
<i>Веницианов Е. В., Лепихин А. П.</i> Актуальные проблемы управления качеством вод	13
<i>Фруммин Г. Т.</i> Экологические проблемы трансграничных водных объектов	17

География и гидрология

<i>Давыденко Е. В.</i> Определение максимальных уровней воды неизученных озер на примере водоемов Северо-Запада РФ	22
<i>Корнеевкова Н. Ю.</i> Оценка многолетней динамики площадей озер юга Западной Сибири по данным спутниковых снимков	25
<i>Ломов В. А.</i> Изучение эмиссии метана с поверхности долинного водохранилища с применением математического моделирования	28
<i>Панова Н. В., Воякина Е. Ю.</i> Исследование лимнологических параметров озера Сисъярви (Валаамский архипелаг, Ладожское озеро)	33
<i>Одинокова К. Д., Примак Е. А.</i> Оценка устойчивости трансформированных водных объектов Карелии с учетом нелинейности	35
<i>Чекмарева Е. А.</i> Ограничения рекреационного водопользования озер северо-запада Тверской области . . .	39
<i>Чернов И. А., Толстиков А. В., Яковлев Н. Г.</i> Численное моделирование биогеохимических процессов в Белом море с учетом экосистемы морского льда	43
<i>Яковлев Н. Г., Чернов И. А.</i> Новая совместная модель Северного Ледовитого океана и морского льда	46

Гидрохимия

<i>Беспалова К. В.</i> Формирование и качество водных ресурсов реки Большой Кинель	48
<i>Зобкова М. В., Галахина Н. Е., Ефремова Т. А., Зобков М. Б.</i> Методика определения содержания микропластика в донных отложениях вод суши	52
<i>Макарова М. А., Шелутко В. А.</i> Оценка влияния урбанизированных территорий на формирование стока биогенных элементов в реке Великой	56
<i>Никерина Н. В., Задонская О. В.</i> Оценка природных фоновых концентраций в истоке и устье реки Нарвы	60
<i>Постевая М. А., Слуковский З. И., Даувальтер В. А.</i> Сезонная динамика химических показателей воды озера Семеновского (город Мурманск) в 2019 г.	63
<i>Проскуракова М. М., Слуковский З. И., Елизарова И. Р.</i> Снег как индикатор загрязнения поверхностных водоемов на примере озера Семеновского (город Мурманск)	67
<i>Строков А. А., Санин А. Ю.</i> Оценка природной составляющей металлов в воде Онежского озера . . .	71
<i>Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А.</i> Сульфатредукция в донных отложениях системы озер юга Архангельской области	75
<i>Фруммин Г. Т., Циньлин Ч., Дроздов В. В.</i> Оценка экологического состояния озер Дунчан-ху и Даминг-ху в условиях антропогенного воздействия промышленных районов Северо-Восточного Китая	78

Гидробиология

<i>Вокуева С. И., Денисов Д. Б.</i> Использование диатомовых комплексов донных отложений для оценки состояния водных экосистем в зоне влияния городских объектов	82
<i>Зуева Н. В., Гришуткин О. Г., Зув Ю. А., Ефимов Д. Ю., Бобров А. А.</i> Оценка экологического состояния системы реки Паз по гидробиотическим показателям	86
<i>Лаитушенко А. О., Мегер Я. В., Кладченко Е. С., Андреева А. Ю.</i> Антиоксидантный статус клеток жабр мидий в условиях кратковременной гипоксии	88
<i>Лопичева О. Г.</i> Особенности фитопланктона реки Свири как природно-техногенного участка Онежско-Балтийского водного пути	92

<i>Макарова Е. М.</i> Многолетняя динамика бактериопланктона пелагиали Петрозаводской губы Онежского озера	95
<i>Мухин И. А.</i> Мшанки каменистых литоральных отмелей шхерного района Ладожского озера	98
<i>Петухова М. Д., Старухина А. Д., Мухин И. А., Дудакова Д. С.</i> Факторы пространственной структуры популяции <i>Asellus aquaticus</i> (Crustacea, Isopoda) скальной литорали Ладожского озера	101
<i>Пимеенко Е. С., Черевичко А. В.</i> Изменение темпа роста окуня (<i>Perca fluviatilis</i> L.) младших возрастов в Чудском озере	106
Родионова Н. В., <i>Старухина А. Д., Дудакова Д. С.</i> Изучение суточных миграций зоопланктона в шхерном районе Ладожского озера	109
<i>Сергеева В. О., Воякина Е. Ю.</i> Оценка трофического статуса озер Валаамского архипелага	114
<i>Суховило Н. Ю., Куксовский А. А., Власова Д. Б.</i> Динамика высшей водной растительности водоемов национального парка «Браславские озера» в условиях изменения природной среды и режима охраны	117
<i>Федорова В. С.</i> Осеннее цветение воды в озере Святозеро в 2019 г.	121
<i>Фомина Ю. Ю.</i> Состояние экосистемы Кондопожского залива Онежского озера в районе расположения форелевых хозяйств по показателям зоопланктона	125
<i>Фомина Ю. Ю.</i> Фенологические фазы зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера	128
<i>Чернышев А. Н.</i> Трофическая структура зоопланктона озера Лешего (о. Валаам, Ладожское озеро)	131

Донные отложения континентальных водоемов

<i>Беляев П. Ю.</i> Особенности строения четвертичных отложений северной части котловины Онежского озера	135
<i>Быков В. М., Яковлев Е. Ю., Очеретенко А. А., Данилов К. Б., Чупаков А. В., Чупакова А. А., Кудрявцев Г. В.</i> Оценка скоростей осадконакопления по данным радиоизотопного датирования по свинцу-210 в меромиктическом пресноводном озере Светлом (север Архангельской области)	139
<i>Гатальская Е. В., Белкина Н. А.</i> Фосфор в донных отложениях Иваньковского водохранилища	143
<i>Масленникова А. В., Гулаков В. О.</i> Изменения диатомовых комплексов донных отложений озера Тургояк как отражение антропогенного воздействия	147
<i>Морозова И. В., Белкина Н. А., Потахин М. С., Слукровский З. И.</i> Метан в донных отложениях Выгозерского водохранилища	150
<i>Мясникова Н. А.</i> Гранулометрический анализ донных отложений озера Торосьярви	154
<i>Потахин М. С.</i> Морфогенетическая классификация водоемов бассейна Онежского озера (Республика Карелия)	157
<i>Рязанцев П. А.</i> Возможности и задачи метода георадиолокации при лимнологических исследованиях	161
<i>Слукровский З. И., Медведев М. А., Григорьев В. А., Мицуков А. С.</i> Экогеохимия современных отложений малых озер фоновых территорий Арктической зоны РФ в Республике Карелия и Мурманской области	165

Гидрофизика

<i>Гавриленко Г. Г., Тержеев А. Ю., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Богданов С. Р.</i> Условия выхода мелководного бореального озера из-под льда и особенности весеннего перемешивания	170
<i>Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Гузева А. В., Евграфова С. Ю., Шадрина А. А., Голосов С. Д., Зверев И. С., Федорова И. В.</i> Термический и ледовый режимы арктических озер на фоне изменчивости регионального климата	174
<i>Здоровеннова Г. Э., Федорова И. В., Шадрина А. А., Гавриленко Г. Г., Богданов С. Р., Ефремова Т. В., Тержеев А. Ю., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И.</i> Растворенный кислород в покрытых льдом озерах: сезонная и высокочастотная изменчивость	179
<i>Круглова Е. Е., Мехова О. С.</i> Анализ циркумполярных ледовых карт Антарктиды	182
<i>Шульга Т. Я., Матузаева О. В.</i> Численный прогноз протяженности затоплений/осушений побережья Азовского моря при сгонно-нагонных ветрах	185

CONTENT

<i>Preface (Filatov N. N.)</i>	7
<i>Belkina N. A.</i> Study of the modern sedimentation regime in lakes of the humid zone (example of Karelia) . . .	9
<i>Venitsianov E. V., Lepikhin A. P.</i> Topical problems of water quality management	13
<i>Frumin G. T.</i> Environmental problems of transboundary water objects	17

Geography and hydrology

<i>Davydenko E. V.</i> Calculation of maximum water levels of unexplored lakes: lakes of north-west Russia as an example	22
<i>Korneenkova N. Yu.</i> Assessment of the long-term dynamics of the lake areas in the south of Western Siberia using satellite images	25
<i>Lomov V. A.</i> Research on methane emissions from a valley-based storage reservoir by mathematical modeling methods	28
<i>Panova N. V., Voyakina E. Yu.</i> Research into the limnological parameters of Lake Sisjarvi (Valaam archipelago, Lake Ladoga)	33
<i>Odinokova K. D., Primak E. A.</i> Assessment of the resistance of transformed water bodies in Karelia with allowances for non-linearity	35
<i>Chekmareva E. A.</i> Limitation of recreational water use of lakes in north-western Tver region	39
<i>Chernov I. A., Tolstikov A. V., Iakovlev N. G.</i> Numerical simulation of biogeochemical processes in the White sea, including the sea-ice ecosystem	43
<i>Iakovlev N. G., Chernov I. A.</i> A new integrated model of the Arctic ocean and sea ice	46

Hydrochemistry

<i>Bespalova K. V.</i> Formation and quality of water resources of the Bolshoy Kinel river	48
<i>Zobkova M. V., Galakhina N. E., Efremova T. A., Zobkov M. B.</i> A technique for microplastics content determination in inland water sediments	52
<i>Makarova M. A., Shelutko V. A.</i> Assessment of urban impact on the formation of the nutrient flow in the Velikaya river	56
<i>Nikerina N. V., Zadonskaya O. V.</i> Estimation of natural background concentrations in the Narva river source and mouth	60
<i>Postevaya M. A., Slukovskii Z. I., Dauvalter V. A.</i> Seasonal variations of chemical parameters in Lake Semenovskoye (city of Murmansk) in 2019	63
<i>Proskuriakova M. M., Slukovskii Z. I., Elizarova I. R.</i> Snow as an indicator of surface water pollution: the case of Lake Semenovskoye (Murmansk)	67
<i>Strokov A. A., Sanin A. Yu.</i> Assessment of the natural component of Lake Onego water quality	71
<i>Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A.</i> Sulfate reduction in bottom sediments in the system of lakes in southern Arkhangelsk region	75
<i>Frumin G. T., Chen Jenlin, Drozdov V. V.</i> Assessment of the environmental status of lakes Donchang and Daming under anthropogenic impact from industrial areas of north-east China	78

Hydrobiology

<i>Vokueva S. I., Denisov D. B.</i> Using diatom assemblages in sediments to assess the state of aquatic ecosystems in the urban impact zone	82
<i>Zuyeva N. V., Grishutkin O. G., Zuyev Yu. A., Efimov D. Yu., Bobrov A. A.</i> Assessment of the ecological state of the Paz river system by hydrobotanical indicators	86
<i>Lantushenko A. O., Meger Ya. V., Kladchenko E. S., Andreeva A. Yu.</i> Antioxidant status of cells in mussel gill tissue under short-term hypoxia	88
<i>Lopicheva O. G.</i> Characteristics of phytoplankton in river Svir as a seminatural section of the Onega-Baltic waterway	92
<i>Makarova E. M.</i> Long-term patterns of pelagic bacterial plankton in Petrozavodsk bay of Lake Onego	95

<i>Mukhin I. A.</i> Bryozoans of stony littoral sandy beaches of Lake Ladoga skerried region	98
<i>Petukhova M. D., Starukhina A. D., Mukhin I. A., Dudakova D. S.</i> Factors for the spatial structure of the <i>Asellus aquaticus</i> (Crustacea, Isopoda) population in the rocky littoral zone of Lake Ladoga	101
<i>Pimeenko E. S., Cherevichko A. V.</i> Changes in the growth rate of early-age perch (<i>Perca fluviatilis</i> L.) in Lake Peipus	106
Rodionova N. V. , <i>Starukhina A. D., Dudakova D. S.</i> A study of zooplankton diel migrations in the skerried region of Lake Ladoga	109
<i>Sergeeva V. O., Voyakina E. Yu.</i> Assessment of the trophic status of lakes in Valaam archipelago	114
<i>Sukhovilo N. Yu., Kuksovsky A. A., Vlasova D. B.</i> Alteration of the higher aquatic vegetation in waters of the Braslav lakes national park under changes in the natural environment and protection regulations	117
<i>Fedorova V. S.</i> Autumn algal bloom in Lake Svyatozero in 2019	121
<i>Fomina Yu. Yu.</i> State of the Kondopozhsky bay (Lake Onego) ecosystem in the area holding trout farms, assessed using zooplankton as indicators	125
<i>Fomina Yu. Yu.</i> Phenological phases of zooplankton in Petrozavodsk bay of Lake Onego	128
<i>Chernyshev A. N.</i> Zooplankton trophic structure in Lake Leshchovoye (Valaam island, Lake Ladoga)	131

Bottom sediments of continental water bodies

<i>Beliaev P. Yu.</i> Structural features of the quaternary deposits in the northern part of Lake Onego according to the results of geological-geophysical studies	135
<i>Bykov V. M., Yakovlev E. Yu., Ocheretenko A. A., Danilov K. B., Chupakov A. V., Chupakova A. A., Kudryavtsev G. V.</i> Estimation of sedimentation rates in the meromictic Lake Svetloe (northern Arkhangelsk region) using ²¹⁰ Pb dating	139
<i>Gatalskaya E. V., Belkina N. A.</i> Phosphorus in bottom sediments in Ivankovskoye storage reservoir	143
<i>Maslennikova A. V., Gulakov V. O.</i> Lake Turgoyak diatom assemblages changes in response to human impact	147
<i>Morozova I. V., Belkina N. A., Potakhin M. S., Slukovskii Z. I.</i> Methane in bottom sediments of Vygozerskoye storage reservoir	150
<i>Myasnikova N. A.</i> Grain-size analysis of bottom sediments in Lake Torosjarvi	154
<i>Potakhin M. S.</i> A morphogenetic classification of waterbodies in the Lake Onego catchment area (Republic of Karelia)	157
<i>Ryazantsev P. A.</i> Possibilities and tasks for ground penetrating radar application in limnological studies	161
<i>Slukovskii Z. I., Medvedev M. A., Grigoriev V. A., Mitsukov A. S.</i> Geochemistry of recent sediments in small lakes in background areas of the Russian Arctic zone in the Republic of Karelia and Murmansk region	165

Hydrophysics

<i>Gavrilenko G. G., Terzhevik A. Yu., Zdorovenнова G. E., Zdorovenнов R. E., Palshin N. I., Efremova T. V., Bogdanov S. R.</i> The ice-off conditions and spring mixing properties in a shallow boreal lake	170
<i>Zdorovenнов R. E., Zdorovenнова G. E., Guzeva A. V., Evgrafova S. Yu., Shadrina A. A., Golosov S. D., Zverev I. S., Fyodorova I. V.</i> Thermal and ice conditions of arctic lakes in the context of regional climate variability	174
<i>Zdorovenнова G. E., Fyodorova I. V., Shadrina A. A., Gavrilenko G. G., Bogdanov S. R., Efremova T. V., Terzhevik A. Y., Zdorovenнов R. E., Palshin N. I.</i> Dissolved oxygen in ice-covered lakes: seasonal and high frequency variations	179
<i>Kruglova E. E., Mekhova O. S.</i> Analysis of Antarctic circumpolar ice maps	182
<i>Shul'ga T. Ya., Matuzayeva O. V.</i> Predictive simulation of the duration of wind-induced flooding/drying of the sea of Azov coast	185

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник подготовлен по Материалам VI Международной конференции и школы-практики молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление», которые будут проходить в г. Петрозаводске 1–5 сентября 2020 г. Используя наш предыдущий опыт организации подобных мероприятий, мы выбрали форму конференции в виде школы с элементами мастер-классов, которые будут проводиться научными сотрудниками академических учреждений и преподавателями вузов. В отличие от предыдущих мероприятий VI школа-конференция молодых ученых 2020 г. «перешла» границы регионального значения Северо-Запада России, предполагалось более широкое, чем ранее, участие специалистов из-за рубежа. Однако в марте 2020 г. неожиданно случилось событие, которое существенным образом повлияло на жизнь человечества.

Из-за пандемии, связанной с коронавирусом, население планеты столкнулось с проблемой масштабного кризиса. И если в контексте устойчивого развития общества рискам от глобального потепления, нехватки воды, голода отводилась ведущая роль среди наиболее значимых всемирных угроз человечества, в новой ситуации как на общегосударственном, так и региональном уровнях первоочередными стали проблемы национальной безопасности, связанные с выживанием населения, и на первое место вышли проблемы здравоохранения, борьба с бедностью, восстановление экономики, повышение качества окружающей среды, необходимые для нормального проживания.

В новых условиях, несомненно, становится неоспоримым то, насколько велика роль науки, задачи которой предвидеть возможные катаклизмы и благодаря изменению технологий, образа жизни создать новые условия для нормального существования человека, его полного, гармоничного развития. Приходится констатировать: такой глобальный катаклизм, как COVID-19, не смогли предвидеть и мир не готов быстро ликвидировать его последствия. И сегодня с еще большей остротой мы понимаем: мерилom национальной богатства должны стать наука, качество образования, здоровье населения.

История показывает: устойчивое развитие общества, функционирование рынка должны определяться научно-обоснованным государственным регулированием с использованием законодательных и экономических рычагов. Проведенные в нашей стране в недавнем прошлом приватизация, уменьшение роли государственного регулирования не только породили социальную рознь в России, но и нанесли трудновосполнимый урон экономике, науке, здравоохранению. Однако в настоящее время своевременно принятые нашим правительством меры, использованный накопленный ранее опыт борьбы с эпидемиями, решение поставленных науке задач вселяют определенный оптимизм. Наука в нашей стране, несмотря на все трудности, продолжает следовать своему назначению – помогать человеку в его борьбе за жизнь, укреплению безопасности государства, разрабатывать пути коэволюции природы и общества.

Уже к началу XXI века было очевидно, что уровень развития научно-технической сферы, образования, наукоемких отраслей определяет границы между богатыми и бедными странами, создает основу экономического роста. В настоящее время особо важные приоритеты научно-технического развития России должны быть связаны не с грандиозными проектами демонстрационного характера в виде «большого скачка», а с долгосрочной кропотливой работой по укреплению всех звеньев в экономике, здравоохранении, науке, культуре, информационной сфере. Мы должны найти разумный баланс между интересами граждан, общества и государства, между философией личного успеха и разумного самоограничения. Для общества, к которому надо

стремиться, должны быть важны такие ценности, как патриотизм, защита национальных интересов; приоритет высокопрофессионального труда, науки, культуры, образования; физическое и нравственное здоровье населения.

Без сомнения, глобальный кризис, вызванный пандемией, внес и еще внесет коррективы в нашу научную и образовательную деятельность, в нашу жизнь, но для этого и существует наука, которая должна помогать предвидеть возможные пути развития общества и их последствия. Но надо не только мечтать – надо действовать, несмотря ни на что, иногда и вопреки обстоятельствам. Мы надеемся на то, что молодежь будет стремиться в науку – познавать, открывать новое. Этому и будет способствовать наша молодежная конференция, которая готовилась в непростых условиях работы, в режиме он-лайн. Наша молодежь показала, что готова к преодолению трудностей общения на международном уровне, и мы этому рады и желаем успехов всем участникам конференции.

Член-корреспондент РАН Н. Н. Филатов

ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО СЕДИМЕНТАЦИОННОГО РЕЖИМА ВОДОЕМОВ ГУМИДНОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР КАРЕЛИИ)

Н. А. Белкина

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

Обсуждаются основные методологические принципы и подходы к изучению закономерностей современного континентального седиментогенеза водоемов северной гумидной зоны. Выполнен анализ связей между вещественным составом донных отложений и ландшафтными характеристиками водосборной территории озер. Выявлены основные типы озерного накопления, встречающиеся в водоемах Карелии. Разработана уникальная программа изучения современного седиментационного режима Онежского озера и показана пространственно-временная неоднородность процессов формирования донных отложений в озере.

Понимание процессов, происходящих в озерных экосистемах, и прогнозирование их возможных изменений в будущем в условиях климатических колебаний и антропогенной нагрузки невозможно без изучения закономерностей современного континентального седиментогенеза. Процесс озерного осадконакопления ограничен определенным интервалом времени «жизни» водоема, пространством и количеством источников осадочного вещества. Основные черты, характеризующие гумидный тип литогенеза на континентальном блоке, были сформулированы еще в прошлом веке: осадочный материал, образующийся в корах выветривания, переносимый реками и накапливаемый в конечных водоемах стока, благодаря физическим, физико-химическим, химическим и биологическим процессам имеет разнообразный вещественный состав и крайне неравномерное распределение [Страхов, 1962; Лисицын, 1991]. Но до настоящего времени не проведено обобщение закономерностей седиментогенеза на уровне крупных регионов. Более того, в последние 30 лет изучение формирования современных донных отложений озер гумидных, низкотемпературных территорий имеет крайне спорадичный характер. Поэтому первым шагом нашей работы стали обобщение и сравнительный анализ имеющихся данных химического состава поверхностного слоя донных отложений водоемов Карелии, расположенных на юго-восточной окраине Фенноскандинавского щита в бассейне Онежского озера.

Было показано, что в условиях умеренного влажного климата на этой территории доминируют озера со смешанным типом озерного накопления. Различия в химическом составе отложений и большой разброс значений для каждого выделенного типа осадка определяются разным генезисом взвешенного вещества, отличиями гидрологических, морфометрических и биологических характеристик озер. Неравномерное распределение осадочного материала на дне водоемов закономерно контролируется морфологией котловины, глубиной и динамикой вод [Belkina, Kulik, 2018].

Было выявлено, что для большинства исследованных озер характерен *железо-кремне-гумусовый* тип накопления. А в малых неглубоких ламбах ($S_{\text{зеркала}} < 1 \text{ км}^2$), составляющих 97 % от общего числа озер Карелии, он встречается повсеместно. Причем накопление органического вещества протекает в этих водоемах независимо от ландшафтных особенностей водосбора, трофического

статуса и химического состава вод озера. Общей закономерностью также является то, что содержание органического вещества в донных отложениях озер Карелии, как правило, увеличивается с ростом трофического статуса водоема от олиготрофного к эвтрофному [Belkina, Kulik, 2018].

Наиболее распространенным типом озерного накопления, где формируются минеральные осадки (зольность > 70 %), является *железо-гумусо-кремневый*. Как правило, минеральный тип накопления чаще встречается в водоемах с высокой проточностью ($20 < S_{\text{зеркала}} < 200 \text{ км}^2$). Озера, где в настоящее время накапливаются диатомовые (оз. Сяргозеро) или карбонатные осадки (оз. Рахойлампи, Падмозеро), встречаются на территории бассейна редко [Belkina, Kulik, 2018].

Гумусо-железо-кремневые донные отложения формируются в водоемах с относительно большой площадью водосбора (с высоким % заболоченности) и развитой литоральной зоной. Они обнаружены как в олиготрофных озерах с низкой цветностью воды с глубоко врезанными котловинами, так и в мелких проточных водоемах с высокой цветностью вод. Обычно в литоральной зоне таких водоемов (шириной до 300 м) на глубине от 1 до 5 м залегают озерные руды мощностью от 1 см до 1 м. Ярким примером таких водоемов является оз. Шотозеро. Рудные образования занимают здесь 43 % площади дна, а содержание металлов в них достигает 40 % Fe и 2 % Mn.

Анализ связей между вещественным составом донных отложений и ландшафтными характеристиками водосборной территории показал, что площадь водосбора и его геологические и геоморфологические особенности влияют на поступление веществ в озеро и определяют накопление минеральной составляющей донных отложений. Морфогенетические характеристики озерных котловин влияют на продукционные процессы в водоеме и определяют накопление в донных отложениях органического вещества, а от поступления железа в донные отложения зависит постседиментационное преобразование осадка [Belkina, Kulik, 2018].

Методической основой для планирования изысканий, связанных с изучением донных отложений, является комплексность исследования. Первым этапом при составлении программы исследований является анализ всей доступной информации об объекте и его водосборном бассейне. Необходимо рассмотреть такие вопросы, как географическое положение, вероятная история возникновения и развития озера, характер и генезис ландшафта водосборной территории, морфология озерной котловины, распределение речного стока, гидрологические, гидрохимические и гидробиологические особенности водоема, антропогенная нагрузка, вещественный состав и стратиграфия донных отложений и др. В случае если информации о водном объекте недостаточно – принцип системного подхода требует проведения рекогносцировочных исследований водоема. Например, картирование дна по типу донных осадков и их химическому составу или исследование вод на содержание в них загрязняющих веществ, что позволит определить фактическую ситуацию и обеспечит привязку к конкретным условиям водного объекта. На основании результатов обследования для проведения периодических наблюдений за взвешенным веществом и донными отложениями должна быть сформирована сеть пунктов наблюдения, включающая как фоновые, так и проблемные зоны.

Необходимо подчеркнуть, что основными принципами организации и проведения наблюдений на водоеме являются регулярность и комплексность, репрезентативность мест отбора проб воды, взвешенного вещества и донных отложений, согласованность сроков отбора. Перечень контролируемых показателей должен учитывать как природные особенности озера, так и специфику загрязнения водного объекта и обеспечивать единство и достоверность измерений при анализе проб воды и донных отложений. Соблюдение всех вышеперечисленных принципов является необходимым для решения задачи количественной и качественной оценки поступления веществ в озеро и в донные отложения. Программа изучения процесса формирования донных отложений обязательно должна учитывать гидрологический режим водоема. Периодичность наблюдений, сроки отбора проб воды, взвешенного вещества и донных отложений устанавливаются с учетом гидрологической ситуации.

На примере исследований современного седиментационного режима Онежского озера (второй по величине в Европе олиготрофный холодноводный водоем), проводимых в ИВПС КарНЦ РАН на протяжении последних 50 лет, можно продемонстрировать сложность поставленной цели и применение комплексного методологического подхода для достижения поставленных задач. В Онежском озере наблюдается *гумусо-железо-кремневый* тип накопления. Особенностью любого большого водоема со сложной морфологией котловины является неравномерное распределение донных отложений. Различия в процессе формирования донных отложений разных районов Онежского озера, связанные как с естественными причинами (морфология котловины, речной

сток, геологические и геоморфологические особенности водосбора и т. д.), так и с неравномерным распределением антропогенной нагрузки, явились основанием для разработки уникальной программы исследований современного седиментационного режима озера.

Решение сложной проблемы предполагает ее деление на блоки. В нашем случае, очевидно, что это (1) водосбор, (2) водная толща и (3) поверхностный слой донных отложений. Задачей 1 блока является ответ на вопрос: «Что поступает в озеро?» Для решения этой задачи необходимы знания о водном балансе озера и количественном и качественном составе вещества, приходящего из разных источников в озеро, на основе которых выполняется оценка химического баланса. Задачей 2 блока является ответ на вопрос: «Что поступает в донные отложения?» Ее решение базируется на знании физических, химических и биологических процессов, происходящих в водной массе озера и связанных с трансформацией вещества, приходящего в водоем. Задачей 3 блока является ответ на вопрос: «Что захоранивается в донных отложениях?», поскольку часть вещества возвращается обратно в воду в результате диагенеза.

На основе анализа известной информации о разных источниках поступления вещества в Онежское озеро была сформирована сеть наблюдений, к которой относятся устья впадающих водотоков и исток из озера, береговые точечные антропогенные источники и районы сброса сточных вод на акватории водоема, аккумуляционные и склоновые участки дна озера, выбранные в соответствии с морфологическими особенностями котловины, и т. д. По результатам изучения распределения осадков по площади дна и изменений химического состава донных отложений (за период с 1960 по 2019 гг.) Онежское озеро делится на 14 крупных районов: Центральное Онего, Большое Онего, Южное Онего, Малое Онего, Петрозаводская губа, Кондопожская губа, Лижемская губа, Горская губа, Уницкая губа, Повенецкий залив, Большая губа Повенецкого залива, Заонежский залив, Кижы, Великая губа). В озере также более 30 малых губ и бухт (Святуха, Кефть, Челмужская, Оров-губа, Пергуба, Лумбушская, Пиньгуба, Ялгуба и т. д.), отличающихся седиментационным режимом и, как следствие, вещественным составом донных осадков [Семенович, 1973; Васильева и др., 1999; Белкина, 2015]. В указанных выше районах были уточнены перспективные участки береговой зоны и акватории водоема для наблюдения за процессом формирования донных отложений.

Наблюдения за химическим составом речных и озерных вод проводились в разные сезоны не менее 4 раз в год. Взвешенное вещество выделяли методом вакуумной фильтрации (\varnothing 0,45 μ m). Для сбора взвешенного вещества, поступающего на дно, использовались седиментационные ловушки (время экспозиции 1 год), установленные на 20 станциях в аккумуляционных зонах основных крупных районов озера. Донные отложения отбирались гравитационными трубками разных конструкций, позволяющими сохранить границу вода – дно в нетронутом состоянии. Химические анализы выполнялись на базе ИВПС КарНЦ РАН общепринятыми методами [Hakanson, Jansson, 1983].

Средняя скорость осадконакопления в Онежском озере была оценена на основе химического баланса озера с учетом трансформации химических элементов в воде озера. Твердый сток в Онежское озеро оценен в 96 000 т. Поступление в озеро основных элементов донных отложений в растворенных формах составило: 7000 т Si, 15 000 т Fe, 1000 т Mn, 4000 т Al. Для того чтобы учесть дополнительный поток на дно нерастворимых соединений этих элементов, образующихся за счет биогеохимической трансформации в воде озера, были введены коэффициенты, численно равные удерживающей способности водоема по отношению к этим элементам, представленной в работах Н. В. Кулик [Кулик и др., 2020]. Поступление органического вещества в донные отложения учитывалось по его доле в составе поверхностных взвесей донных отложений и взвешенного вещества из седиментационных ловушек. Вещество, поступающее на дно Онежского озера, состоит из обломочного материала (принесенного речным стоком, площадным стоком, атмосферным переносом), биохомогенного материала неорганической природы (внутриводоемные процессы), автохтонного и аллохтонного органического вещества. В результате выполненных расчетов общая седиментационная нагрузка составила около 170 000–190 000 т/год, причем основную часть вещества составляют соединения кремния (74 %), железа (14 %) и углерода (8 %). Поступление неорганических веществ в донные отложения Онежского озера оценивается в 140 000 т/год, из них более 40 000 т образуется в самом озере. Поступление органических веществ в донные отложения Онежского озера оценивается в 30 000–45 000 т/год. Необходимо подчеркнуть, что более 50 % от общей массы поступающих в донные отложения веществ составляет обломочный материал, а около 45 % – имеет внутриводоемное происхождение. Средняя скорость осадконакопления по водоему, рассчитанная на основе химического баланса, равна 0,2 мм/год, для аккумуляционной зоны озера – 0,4 мм/год. Необходимо

отметить, что выполненная оценка вклада донных отложений в химический баланс озера не учитывает абразию и эоловую составляющую в приходной части баланса для твердого вещества. Атмосферная составляющая, оцененная по среднему содержанию взвешенного вещества в снеге, не учитывает поступление в другие сезоны года.

Впервые одновременно для разных районов Онежского озера были получены данные «прямых» наблюдений о скоростях осадконакопления и изучен их химический и вещественный состав. Осадок в седиментационных ловушках был представлен алевропелитами коричневого (темно-коричневого цвета). Скорость осадконакопления в зависимости от района изменяется более чем на порядок: от 1 мм до 3 см свежесожденного неконсолидированного вещества, или от 0,1 до 2,8 мм/год уплотненного грунта (здесь и далее – расчет на глубину 20 см). Самые высокие скорости осадконакопления, зафиксированные в Кондопожской губе (от 0,6 до 2,8 мм/год), объясняются влиянием сточных вод Кондопожского ЦБК, содержащих большое количество твердых веществ. Скорость осадконакопления в других заливах значительно ниже, чем в Кондопожской губе, и выше, чем в открытой части озера. Она изменяется от 0,1 (Повенецкий залив) до 0,8 мм/год (Петрозаводская губа). Величины скорости осадконакопления в открытых районах озера, которые были получены из натуральных наблюдений в седиментационных ловушках, изменяются от 0,1 (Малое Онего) до 0,4 (Большое Онего) мм/год. Они близки к расчетным оценкам по модели химического баланса озера, описанной выше, а также к оценкам, полученным на основе анализа активности ^{137}Cs и ^{210}Pb в поверхностном слое донных отложений в Малом и Большом Онего.

По своим физико-химическим характеристикам взвешенное вещество из седиментационных ловушек представляет собой коллоидную систему со средней плотностью 1,06 г/мл, имеющую окисленный или слабо-окисленный характер (Eh изменяется от 270 до 376 мВ) и нейтральные значения pH (от 6,3 до 7,3). По своему химическому составу вещество, поступающее на дно, содержало органического вещества на 20–30 % больше, чем его содержание в поверхностном слое донных отложений. Оценка интенсивности процессов разложения органического вещества в донных отложениях Онежского озера, рассчитанная разными методами (на основе градиентов концентраций O_2 , CO_2 в воде и $\text{C}_{\text{орг}}$ на границе вода – дно, а также по распределению $\text{C}_{\text{орг}}$ в поверхностном слое донных отложений), показала, что в зависимости от типа осадка и периода накопления значение скорости деструкции изменяется от 0,1 мг до 1 г углерода на квадратный метр, что соответствует 15 000–45 000 т органического вещества в год.

Таким образом, изучение особенностей современного континентального седиментогенеза северной гумидной зоны является комплексной задачей, для решения которой необходимо учитывать всю совокупность физических, геохимических и биологических факторов, включая состав взвешенного и органического вещества в водной толще, минералого-геохимический и гранулометрический составы осадков, их изменение во времени в сочетании с геоморфологией ландшафта водосборной территории и котловины водоема и их антропогенной трансформацией, гидрологическими и температурными условиями и динамикой вод.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-45-100002.

Список литературы

- Белкина Н. А. Фосфор в донных отложениях Онежского озера // Изв. РГПУ им. А. И. Герцена. 2015. № 173. С. 97–109.
- Васильева Е. П., Давыдова Н. Н., Белкина Н. А. Особенности формирования донных отложений // Онежское озеро, экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 109–145.
- Кулик Н. В., Белкина Н. А., Ефременко Н. А. Поступление, трансформация и распределение марганца в Онежском озере // Моск. экон. журн. 2020. № 1. doi: 10.24411/2413-046X-2020-10063 (электронное издание).
- Лисицын А. П. Процессы терригенной седиментации в морях и океанах. М.: Наука, 1991. 269 с.
- Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука, 1973. 102 с.
- Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. М.: Изд-во АН СССР. Т. 1. 1960. 212 с.; Т. 2. 1962. 574 с.; Т. 3. 1962. 550 с.
- Belkina N. A., Kulik N. V. The chemical composition of sediments as a criterion for assessing the state of lakes in the humid zone (on the example of the karelian lakes // Paleolimnology of Northern Eurasia: experience, methodology, current status: Proceedings of 3rd International Conference. Kazan: Publishing House of Kazan Univ., 2018. P. 20–23.
- Håkanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin: Springer, 1983. 316 p.

STUDY OF THE MODERN SEDIMENTATION REGIME IN LAKES OF THE HUMID ZONE (EXAMPLE OF KARELIA)

N. Belkina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

The article discusses the main methodological principles and approaches to studying the patterns of modern continental sedimentogenesis of lakes in the northern humid zone. An analysis of the relationships between the material composition of bottom sediments and the landscape characteristics of the catchment area of the lakes was performed. The main types of sediments found in lakes of Karelia were identified. A unique program for studying the modern sedimentation regime of Lake Onego was developed. The spatial-temporal heterogeneity of sediment formation processes in a large lake is demonstrated.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ВОД

Е. В. Веницианов¹, А. П. Лепихин²

¹ *Институт водных проблем РАН, Москва*

² *Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь*

Представлен обзор существенных проблем системы управления качеством природных вод в России. Устарела система нормирования загрязнения водных объектов с использованием предельно допустимых концентраций. В развитых странах используется риск-ориентированный подход с учетом используемых на предприятиях технологий. Действующий порядок нормирования сбросов сточных вод на основе нормативов допустимых сбросов имеет принципиальные недостатки. Отсутствуют нормативы содержания загрязняющих веществ в донных осадках, а также система их мониторинга. Не используются современные подходы к определению и оценке опасности органических ксенобиотиков. Ключевая проблема регулирования – оторванность экономического механизма от реальных потребностей управления водопользованием. Рассмотрены проблемы разработки и использования схем комплексного использования и охраны водных объектов.

Современное состояние качества поверхностных вод, по данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды в Российской Федерации (опубликованы доклады до 2018 г. вкл.), является стабильным, однако характеризуется рядом проблем.

Услугами централизованного водоснабжения (ЦСВ) в РФ пользуются около 120 млн человек (82 % населения страны). Если в крупных и средних городах услугами ЦСВ обеспечено 100 % населения, то в сельских населенных пунктах всего 33 % [Жилищное хозяйство в России, 2016]. Доля воды, пропускаемой через системы водоподготовки, составляет 59 %, а в сельских населенных пунктах – менее 20 %. Около четверти водозаборов из поверхностных источников водоснабжения не имеют необходимых очистных сооружений. Каждый второй житель РФ вынужден использовать для питьевых целей воду, не соответствующую по ряду показателей установленным нормативам [Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.08, 2009].

Слабость управления водным хозяйством не только следствие недостаточности инвестиций, но в определенной мере и причина такой недостаточности. Существует положительная обратная связь между низким уровнем капиталобеспеченности и инвестициями: чем ниже уровень фондов, тем меньше инвестиций, и наоборот. В экономической системе действует правило: богатые богатеют, бедные беднеют, это относится не только к странам и корпорациям, но и к отраслям народного хозяйства. Государственное управление обязано противостоять подобным рыночным тенденциям.

Два подхода к регулированию качества вод. В России принят подход к природоохранному регулированию на основании нормирования воздействия на водные объекты, в том числе с использованием предельно допустимых концентраций (ПДК); в мировой практике он получил

название *опасность-ориентированного подхода*, или концепции «нулевого» риска. При несоблюдении установленных нормативов качества воды водопользователь обязан устранить причины превышения таких нормативов и компенсировать ущерб платежами за негативное воздействие на окружающую среду. Иначе говоря, в концепции «нулевого» риска критерием допустимости загрязнения является выполнение неравенства:

$$C \leq ПДК, \quad (1)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества в так называемом «контрольном створе».

В природоохранительном законодательстве развитых стран уже более 20 лет происходит планомерный переход от *опасность-ориентированного к риск-ориентированному подходу* [Guidance for Water Quality-Based Decisions, 1991]. В этом случае для каждого из загрязняющих веществ определяются вероятность воздействия на живые организмы и возможные негативные эффекты такого воздействия на основании информации о свойствах загрязняющего вещества, его трансформациях в водном объекте, состоянии самого водного объекта. Учитываются используемые на предприятии технологии. На основании результатов оценки рисков принимается решение о необходимости и способах ликвидации водопользователем последствий загрязнения, а также размер платежей за загрязнение. Риск-ориентированный подход при регулировании качества вод в развитых странах реализован через ряд систем: выдачи разрешений на осуществление хозяйственной деятельности, контрольно-надзорной деятельности, регулирования рынка производителей химических веществ REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals).

В настоящее время в России существующие системы нормативов качества природных вод – при водохозяйственном (ПДК_в) и рыбохозяйственном (ПДК_{вр}) использовании водных объектов – установлены для всех водных объектов страны. Проблема состоит в том, что эти нормативы экологически, гидрологически не обоснованы, разработка Национального проекта «Экология», который включает в себя 11 федеральных проектов, не затрагивает основных проблем экологической безопасности – законодательной, нормативно-правовой и финансовой основы. В частности, используемое уравнение (1) для расчета платежей за загрязнение вод невыполнимо в большинстве случаев для достигнутого в настоящее время уровня технологий. Современное бизнес-сообщество России ни технологически, ни экономически не готово к выполнению действующих нормативов.

Управление качеством воды в водных объектах и нормирование водоотведения. В настоящее время реализуется максимально расширенная трактовка понятия *рыбохозяйственный объект*: без каких-либо ограничений и исключений все водные объекты рассматриваются как рыбохозяйственные.

Установление технологически недостижимых, экономически неоправданных и экологически необоснованных жестких нормативов приводит, вопреки намерениям законодателей, не к улучшению экологической ситуации, а к ее ухудшению. Если для выполнения установленных нормативов требуются затраты, превышающие ресурс предприятий, водопользователь вынужден решать свои проблемы вне рамок правового поля. Представляется, что ПДК_{вр} следует устанавливать как допустимое превышение естественного фонового значения.

Анализ действующей модели нормирования сбросов сточных вод на основе нормативов допустимых сбросов (НДС) показал наличие у нее принципиальных недостатков, в том числе:

- игнорирование возможности достижения нормативов при современном уровне технологий производства;
- система НДС существует наряду с системой временно разрешенных сбросов;
- система не учитывает фактического состояния водных объектов, поэтому повсеместно не выполняется;
- система НДС является причиной массового развития порочной практики сокрытия и искажения фактических данных о сбросах.

Система охраны водных объектов на практике сводится к игнорированию региональных особенностей водных объектов в виде *целевых показателей качества вод*, предусмотренных Водным кодексом РФ (статья 35).

Кроме того, в ней содержится невыполнимый запрет на сброс веществ, для которых не установлен НДС и не определены ПДК, бесосновательно игнорируется такой ключевой для зарубежных практик метод контроля, как определение токсичности. Для многих участков бассейнов российских рек основная часть загрязняющих веществ поступает с неконтролируемым, чаще всего диффузным стоком, однако система НДС игнорирует диффузные источники загрязнения.

Ситуация с переходом к системе регулирования качества сбросов на основе наилучшей доступной технологии (НДТ) весьма тревожная. В РФ были разработаны 55 информационно-технических справочников по НДТ (ИТС). Однако во многих ИТС отсутствуют технологические показатели НДТ по сбросам, а для имеющихся имеется ряд серьезных замечаний. Совместное применение принципа НДС и принципа НДТ может привести к сложным коллизиям в нормировании сбросов.

Правовую неясность вносит постановление Правительства от 28.02.2019 № 206: любой водный объект, в котором обитают водные организмы, например одноклеточные водоросли, попадает в категорию рыбохозяйственного. Следовательно, будет продолжено нормирование сбросов на основе ПДК_{вр}.

Важным недостатком системы регулирования качества вод является отсутствие нормативов содержания загрязняющих веществ в донных осадках. Значительная часть загрязняющих веществ аккумулируется в донных отложениях [Научные основы..., 2016], вероятность выхода вторичных загрязнений из них высока. Отсутствует мониторинг донных отложений.

Единственный первичный документ по объему и составу сбросов сточных вод – форма отчетности 2ТП Водхоз, но она составляется самими предприятиями, и достоверность такой исходной информации сомнительна. Вне системы контроля и фактически водоохраны находятся диффузные (рассредоточенные) неконтролируемые источники.

Современные подходы к оценке опасности органических ксенобиотиков. В развитых странах более 20 лет проводятся активные исследования органических ксенобиотиков в окружающей среде, обсуждается необходимость включения опасных ксенобиотиков, в частности лекарственных соединений, в перечни веществ, подлежащих обязательному мониторингу и регулированию.

Общее количество представителей различных групп ксенобиотиков, обнаруживаемых в неочищенных сточных водах крупных городов развитых стран, достигает 900–1000 представителей. Около 60 % химических анализов во всех странах мира выполняются хроматографическими методами. Можно определить содержание супертоксикантов, в частности диоксинов, в водной среде при крайне низких концентрациях. Главная причина успеха – совершенная аппаратура, выпускаемая в развитых странах. В России современные хроматографы и масс-спектрометры не производятся. Идентификация соединений, находящихся в воде, позволяет не только формально определить их номенклатуру, а также структурные формулы и на основе этих данных оценить вид их опасного действия, в некоторых случаях и пределы опасных концентраций даже при отсутствии нормированных значений ПДК для них.

Следует использовать расчетные методы оценки вида токсичности вещества и его опасных концентраций, которые формируются на основе знаний структуры вещества, а также информационных технологий, связанных с поиском сведений об опасности веществ в международных базах данных и регистрах [Научные основы..., 2016].

Современная версия компьютерной программы PASS 2014 прогнозирует 7157 активностей на основе данных о 960 тыс. соединений. Средняя точность предсказания составляет 94,1 %. Список видов биологической активности включает в себя основные и побочные фармакологические эффекты, биохимические механизмы действия, специфическую токсичность, мишени в организме.

Методы на основе обучающей выборки позволяют также прогнозировать и некоторые количественные характеристики токсичности. Например, по программе GUSAR можно провести расчет фактора биоаккумуляции, показателей острой токсичности LD50 и IGC50 (концентрация полумаксимального ингибирования роста).

Экономические проблемы регулирования качества вод. Ключевая проблема российского водного хозяйства – оторванность его экономического механизма от реальных потребностей управления водопользованием, прежде всего – водоохраны. Текущие затраты на охрану и рациональное использование водных ресурсов в 2019 г. по сравнению с 2005 г. составили 85 %. Наблюдается серьезное недофинансирование НИОКР. За последние пять лет имеет место уменьшение суммарного поступления водного налога и платежей за водопользование в номинальном исчислении.

По оценке специалистов, по сценарию «неухудшения состояния водных ресурсов» требуется ежегодно сумма порядка 45 млрд руб., а для улучшения состояния – более 70 млрд. Реально же объем расходов федерального бюджета на водохозяйственные и водоохраные мероприятия находится на уровне 17–18 млрд руб. в год.

За последние 5 лет имеет место уменьшение суммарного поступления водного налога и платежей за водопользование в номинальном исчислении. Еще более ощутимо реальное сокращение, то есть с поправками на инфляцию. В реальном исчислении индексированная сумма поступлений от водного налога и платежей к 2019 г. уменьшилась в четыре раза.

Следует также отметить незначительную роль разработанных во всех бассейнах в соответствии с Водным кодексом РФ Схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО), которые должны были, в частности, обеспечить экологически и экономически обоснованные программы мероприятий по улучшению состояния водных ресурсов.

Концепция СКИОВО, разработанная еще в 1980-е годы, безнадежно устарела. В большинстве стран влияние сбросов сточных вод предприятий (как действующих, так и проектируемых) оценивается с использованием математических моделей. Заметим, что в США для расчета Total Maximum Daily Load (TMDL) – нормативного показателя (аналога НДС и НДСВ) используются сертифицированные программные комплексы, ориентированные на индивидуальный подход для каждого водного объекта и каждого водопользователя [Guidance for Water Quality-Based Decisions, 1991].

Очевидно, что вместо пухлых томов СКИОВО во всех водохозяйственных организациях должны появиться компьютерные информационно-вычислительные системы, оснащенные моделями «подведомственных» бассейнов и их участков. Это будет намного эффективнее, а в конечном счете и дешевле, чем неработающие СКИОВО и неизбежные в бюрократической системе попытки «вдохнуть в них жизнь» – «обновлять», «совершенствовать», «модернизировать» и т. п. под вывеской «инновационного развития». Конечно, переход к использованию информационно-вычислительных систем как основному инструментальному средству в управлении водным хозяйством и водными ресурсами потребует радикальных изменений в подготовке кадров для отрасли.

Неэффективность надзорной деятельности. Деятельность Росприроднадзора за 2011–2015 гг. нельзя охарактеризовать как достаточно эффективную. На фоне кризисной проблемы со сбросом загрязненных сточных вод в водные объекты (а нередко и просто на местность) одна из основных задач ведомства заключается в увеличении поступлений в бюджеты субъектов РФ платежей за загрязнение водных объектов, что наглядно демонстрирует реактивную, а не превентивную политику. Цель проверок – выявление максимально возможного количества нарушений и наложение соответствующих штрафов, а вовсе не снижение загрязнений.

Отсутствие мониторинга форм загрязняющих веществ. В каких фазовых формах содержатся вещества в воде на микроуровне? Это растворенная фаза компонентов, твердая минеральная или органическая фаза в форме взвешенных частиц, коллоидная органическая фаза и планктонная фаза в водной массе. Самое важное заключается в том, что при попадании в воду загрязняющего вещества в истинно растворенной форме, то есть в виде ионов или молекул, обязательно начинается перераспределение вещества между фазами, присутствующими в воде: часть молекул или ионов загрязняющего вещества сорбируется на взвесах, поглощается крупными органическими молекулами или оседает на дно вместе с взвешенными веществами.

Когда говорят о концентрации какого-либо вещества в воде фактически, как правило, имеют в виду среднюю нескольких частных концентраций – в водной массе, во взвесах разного вида (минеральных, органических), в органических коллоидах, в донной массе, в планктоне. Наибольшую опасность представляют истинно растворенные вещества (молекулы или ионы), так как они легче всего проникают через защитную мембрану клетки. Это свойство никак не учитывается в нормативе ПДК.

Большинство взвешенных и коллоидных частиц обладают сорбционными свойствами. Поэтому взвешенные вещества вовсе не являются пассивной частью качества вод, а концентратами и переносчиками большинства загрязняющих веществ. При росте их перечня важно знать концентрацию не только их растворенных форм, но и содержание во взвесах. Существенно, что сорбционные свойства частиц зависят от их дисперсного состава. Максимальными сорбционными свойствами обладают частицы размерами менее 1 мкм.

Необходимо совершенствование системы мониторинга нефтепродуктов. После попадания в воду нефть перестает существовать как смесь компонентов: с ней происходят разнообразные химические, физико-химические, а также метаболические превращения, осуществляемые (в последнем случае) гидробиотой. Однако в России разработано значение ПДК лишь для нефтепродуктов, относящихся к группе углеводов (УВ) в целом. Оно не учитывает специфическую для индивидуальных

УВ токсичность, вариабельность состава исходной нефти, а также то, что нефть как смесь УВ и входящие в ее состав УВ подвержены превращениям в водной среде.

Совершенствование системы регулирования качества природных вод – основная проблема водного хозяйства.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-50082 «Диффузный перенос микро-частицами загрязняющих веществ с территории крупного города в водные объекты бассейна Волги (на примере Нижнего Новгорода)».

Список литературы

- Жилищное хозяйство в России – 2016 г.* Федеральная служба государственной статистики.
Научные основы создания систем мониторинга качества природных поверхностных вод. М.: Научный мир, 2016. 462 с.
Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 г. № 1235-р «Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г.».
Guidance for Water Quality-Based Decisions: The TMDL Process. U. S. Environmental Protection Agency (EPA). Washington, D. C. Doc. No. EPA 440/4-91-001. April 1991.

TOPICAL PROBLEMS OF WATER QUALITY MANAGEMENT

E. Venitsianov¹, A. Lepikhin²

¹ *Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm*

An overview of significant problems of the natural water quality management system in Russia is presented. The system for regulating water pollution using maximum permissible concentrations is outdated. In some countries, a risk-based approach is used, taking into account the techniques used in enterprises. The current procedure for regulating wastewater discharges based on acceptable discharge standards has fundamental disadvantages. There are no standards for the content of pollutants in bottom sediments, or a system for monitoring them. Modern approaches to the determination and assessment of the hazard of organic xenobiotics are used. The key regulatory problem is that the economic mechanism is disconnected from the real needs of water management. The challenges involved in the development and application of the Schemes for integrated use and protection of water bodies are considered.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Г. Т. Фрумин

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Рассмотрены три актуальные проблемы трансграничных водных объектов: проблема оценки качества воды, проблема оценки трофического статуса озер, проблема квотирования биогенных нагрузок на трансграничные водные объекты – и возможные пути их решения.

Для России вопросы трансграничного сотрудничества в области использования и охраны водных ресурсов чрезвычайно актуальны. Бассейны 70 крупных и средних рек страны являются трансграничными. Свыше 40 000 км Государственной границы РФ проходит по рекам, озерам и морям [Тимофеева, Фрумин, 2017]. Российская Федерация граничит с 14 государствами Европы и Азии. Государственную границу пересекает свыше 800 различных водных объектов. 70 больших и средних рек относятся к трансграничным, причем большинство из них являются жизненно важными как для России, так и для граничащих с ней государств [Фрумин, Тимофеева, 2014].

В процессе совместного использования трансграничных водных объектов между государствами возникает множество проблем и спорных вопросов, в особенности в оценке объемов и последствий оказываемого антропогенного воздействия [Рысбеков, 2009].

Необходимость совместного использования трансграничных вод практически всегда приводит к возникновению определенной напряженности в обществах, которые они объединяют. Это обусловлено разнообразными факторами, которые, помимо отношений между странами, включают вопросы национальной безопасности, развития экономического потенциала, открытости и экологической стабильности. Управление трансграничными водными ресурсами (ТВР) может стать как объединяющим моментом, так и причиной конфликта; направленность во многом обусловлена политической волей.

Международные конвенции и соглашения, регламентирующие взаимоотношения государств при совместном пользовании водными объектами, охватывают широкий круг проблем, среди которых до настоящего времени весьма актуальными являются проблема оценки качества воды, проблема оценки трофического статуса трансграничных водоемов, проблема квотирования биогенной нагрузки на трансграничные водные объекты.

Проблема оценки качества воды. Правовую основу использования водных ресурсов в Европе обеспечивает Рамочная директива по воде (РДВ) (2000/60/ЕС), принятая ЕС в 2000 г. Этот документ регламентирует подходы к политике охраны, использования и управления водными ресурсами и призван к 2015 г. гармонизировать и унифицировать подходы стран ЕС к управлению водными ресурсами и их охране [Семенченко, Разлуцкий, 2011]. Природоохранной целью РДВ является достижение «хорошего статуса» всех грунтовых и поверхностных вод. РДВ содержит ряд общих требований по экологической защите поверхностных вод («хороший экологический статус») и общие минимальные требования по химическим параметрам («хороший химический статус»). К примеру, в Эстонии используют следующие показатели: биологические, физико-химические и гидроморфологические. Общая оценка состояния водного объекта дается на основании самого худшего показателя. В Российской Федерации с 2002 г. степень загрязненности вод оценивается гидрохимическими показателями с использованием «удельного комбинаторного индекса загрязненности воды» (УКИЗВ) (РД 52.24.643 – 2002 «Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям»). Осложняет сотрудничество в сфере охраны трансграничных водных объектов отсутствие единых критериев оценки степени их загрязненности.

Попытка оценить качество речных вод на основе химических критериев была сделана в Баварской службе использования вод. Этот метод основан на исследованиях, проведенных ранее в США и Шотландии [Кимстач, 1993]. Метод включает измерение ряда химических параметров в пробах воды с последующим представлением полученной комбинации результатов в виде одного числа (химического индекса), который представляет собой обобщенное качество воды в данной пробе.

Химический индекс является мультипликативным и выражается в следующей форме:

$$CJ = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} = q_1^{w_1} \cdot q_2^{w_2} \cdot \dots \cdot q_n^{w_n}, \quad (1)$$

где CJ – химический индекс, безразмерная величина непрерывной шкалы от 0 до 100 (здесь 0 – худшее и 100 – лучшее качество воды); n – число параметров; q_i – подиндекс для i -го параметра (безразмерная величина между 0 и 100, являющаяся функцией от i -го параметра); W_i – вес i -го параметра, число между 0 и 1, причем сумма весов равна 1 [Фруммин, Фетисова, 2016].

Во второй половине XX века в связи с необходимостью оценки токсичности природных и сточных вод, а также некоторых химических веществ во многих странах мира стали использовать биотестирование на *Daphnia magna* Straus. Дафнии широко применяются в биотестировании в таких странах мира, как США, Германия, Франция, Венгрия и др. Во многих из них дафния принята как стандартный тест-организм.

По данным литературы о токсичности загрязняющих веществ для дафний (медь, свинец, кадмий, цинк, железо, нефтепродукты, фенол, ион аммоний, нитрит-ион, нитрат-ион) были построены линейно-экспоненциальные математические модели, связывающие величины рисков (вероятности) летальных исходов при воздействии этих веществ на дафний в широком диапазоне варьирования концентраций (табл. 1).

Таблица 1. Математические модели для расчетов рисков летальных исходов при воздействии вредных веществ на дафний

Вещество	Модель	Вещество	Модель
Cu ²⁺	Риск = 1 - exp(-25,103C ^{0,956})	Фенол	Риск = 1 - exp(-0,0154C ^{1,2638})
Pb ²⁺	Риск = 1 - exp(-0,2653C ^{1,1})	НП	Риск = 1 - exp(-0,3851C ^{0,7124})
Cd ²⁺	Риск = 1 - exp(-25,103C ^{0,956})	NH ₄ ⁺	Риск = 1 - exp(-0,000000105C ^{5,3345})
Zn ²⁺	Риск = 1 - exp(-2,02C ^{1,168})	NO ₂ ⁻	Риск = 1 - exp(-0,2861C ^{0,8125})
Fe ²⁺	Риск = 1 - exp(-0,017C ^{1,319})	NO ₃ ⁻	Риск = 1 - exp(-0,00186C ^{0,8103})

Примечание. НП – нефтепродукты, С – концентрация, мг/дм³.

Учитывая, что риск является вероятностной величиной, для определения риска комбинированного действия в соответствии с правилом умножения вероятностей, где в качестве сомножителей выступают не риски, а значения, характеризующие вероятности их отсутствия, было применено следующее уравнение [Киселев, Фридман, 1997]:

$$\text{Риск}_{\text{комб}} = 1 - (1 - \text{Риск}_1)(1 - \text{Риск}_2)(1 - \text{Риск}_3) \dots (1 - \text{Риск}_n), \quad (2)$$

где Риск_{комб} – риск комбинированного действия совокупности вредных веществ, Риск_н – риск воздействия индивидуальных вредных веществ.

Для классификации качества воды по уровням их загрязненности металлами была использована модель «разломанного стержня» [Мостеллер, 1975] (табл. 2).

Таблица 2. Классификация качества вод по величинам комбинированных рисков

Качество воды	Риск комбинированный, Риск _{комб}	Класс качества
Очень хорошее	0,00–0,04	I
Хорошее	0,04–0,09	II
Удовлетворительное	0,09–0,16	III
Плохое	0,16–0,26	IV
Очень плохое	0,26–1,00	V

Вышеизложенная методика, базирующаяся на моделях, приведенных в табл. 1 и формуле 2, была использована для оценки качества воды четырех створов трансграничной р. Вуоксы по усредненным данным за период 2014–2019 гг. (табл. 3).

Таблица 3. Качество воды р. Вуоксы

Створ	Риск комбинированный, Риск _{комб}	Качество воды
пгт Лесогорский, створ 1	0,10	удовлетворительное
пгт Лесогорский, створ 2	0,09	удовлетворительное
г. Каменногорск	0,09	удовлетворительное
г. Приозерск	0,10	удовлетворительное

Научная новизна рассмотренного эколого-токсикологического подхода заключается в совместном использовании гидрохимических и гидробиологических показателей, которые ранее использовались отдельно, в виде нового сочетания (новой математической модели).

Проблема оценки трофического статуса трансграничных водоемов. Существующие классификации трофического статуса водных объектов ориентированы на разные показатели и их комплексы. К настоящему времени разработано более пятидесяти методов оценки трофности водных экосистем, существенно различающихся применяемыми индикаторами трофического статуса [Гальцова, Дмитриев, 2007; Фруммин, Хуан, 2011]. Отсутствие единого метода оценки трофического статуса трансграничных водоемов является серьезной нерешенной проблемой международных водных отношений, сдерживающей развитие деятельности по оздоровлению трансграничных водных объектов.

Для оценки трофического статуса озер был использован вероятностный подход, разработанный Организацией экономического развития и кооперации (ОЭРК) и базирующийся на данных о содержании фосфора общего, средней концентрации хлорофилла «а» и средней прозрачности по диску Секки. Для оценки уровня трофности были использованы пять градаций: μ_{уо} – вероятность ультраолиготрофного состояния, μ_о – вероятность олиготрофного состояния, μ_м – вероятность мезотрофного состояния, μ_э – вероятность эвтрофного состояния и μ_т – вероятность гипертрофного

состояния. Кривые вероятностной классификации трофического статуса озер, разработанные ОЭРК, были аппроксимированы аналитическими зависимостями (табл. 4–7). Это обусловлено тем, что использование кривых вероятностного распределения не очень удобно, поскольку не позволяет давать точные оценки трофических состояний.

Таблица 4. Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год концентрациям фосфора общего (ТР), мг/м³

Трофический статус	Формула
Ультраолиготрофный	$\mu(ТР)_{\text{УО}} = 1 - \exp\{-\exp[-0,357 \cdot (ТР) + 1,25]\}$
Олиготрофный	$\mu(ТР)_{\text{О}} = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,947 \cdot \ln(ТР/8)]^2\}$
Мезотрофный	$\mu(ТР)_{\text{М}} = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,995 \cdot \ln(ТР/26)]^2\}$
Эвтрофный	$\mu(ТР)_{\text{Э}} = 0,66 \cdot \exp\{-[-0,964 \cdot \ln(ТР/89)]^2\}$
Гипертрофный	$\mu(ТР)_{\text{ГТ}} = \exp\{-\exp[-0,0123 \cdot (ТР) + 1,65]\}$

Таблица 5. Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год концентрациям хлорофилла «а», мг/м³

Трофический статус	Формула
Ультраолиготрофный	$\mu(\text{Chl}«а»)_{\text{УО}} = 1 - \exp\{-\exp[-2,281 \cdot (\text{Chl}«а»)_{0,9} + 1,6547]\}$
Олиготрофный	$\mu(\text{Chl}«а»)_{\text{О}} = 0,62 \cdot \exp\{-[-0,8757 \cdot \ln(\text{Chl}«а»/1,5)]^2\}$
Мезотрофный	$\mu(\text{Chl}«а»)_{\text{М}} = 0,62 \cdot \exp\{-[-1,0037 \cdot \ln(\text{Chl}«а»/4,8)]^2\}$
Эвтрофный	$\mu(\text{Chl}«а»)_{\text{Э}} = 0,62 \cdot \exp\{-[-0,9495 \cdot \ln(\text{Chl}«а»/15)]^2\}$
Гипертрофный	$\mu(\text{Chl}«а»)_{\text{ГТ}} = \exp\{-\exp[-0,6455 \cdot (\text{Chl}«а»)_{0,5} + 2,958]\}$

Таблица 6. Формулы для расчетов вероятностей трофического статуса водоемов по средним за год величинам прозрачности воды по диску Секки (SD), м

Трофический статус	Формула
Ультраолиготрофный	$\mu(\text{SD})_{\text{УО}} = \exp\{-\exp[(-0,7028 \cdot \text{SD})^{0,9} + 3,275]\}$
Олиготрофный	$\mu(\text{SD})_{\text{О}} = 0,55 \cdot \exp\{-[-1,2818 \cdot \ln(\text{SD}/11)]^2\}$
Мезотрофный	$\mu(\text{SD})_{\text{М}} = 0,55 \cdot \exp\{-[-1,2683 \cdot \ln(\text{SD}/5)]^2\}$
Эвтрофный	$\mu(\text{SD})_{\text{Э}} = 0,55 \cdot \exp\{-[-1,2878 \cdot \ln(\text{SD}/2,3)]^2\}$
Гипертрофный	$\mu(\text{SD})_{\text{ГТ}} = 1 - \exp\{-\exp[-1,5837 \cdot (\text{SD})^{0,9} + 2,144]\}$

Таблица 7. Вероятностная оценка трофического статуса трансграничного Псковско-Чудского озерного комплекса в 2018 г. по содержанию фосфора общего

Озеро	ТР, мг/м ³	$\mu_{\text{О}}$	$\mu_{\text{М}}$	$\mu_{\text{Э}}$	$\mu_{\text{ГТ}}$	Трофический статус
Псковское	91	0,00	0,14	0,66	0,20	мезотрофно-эвтрофный
Теплое	83	0,00	0,17	0,66	0,17	эвтрофно-мезотрофно-гипертрофный
Чудское	44	0,05	0,50	0,33	0,12	мезотрофно-эвтрофный

Проблема квотирования биогенной нагрузки на трансграничные водные объекты. В основу квотирования были положены результаты анализа экспорта биогенных элементов (общего фосфора и общего азота) в Балтийское море со стоком четырнадцати трансграничных рек. Цель этого исследования заключалась в отыскании наиболее информативных дескрипторов для количественного описания связи между поступлением фосфора общего (Q_P) и азота общего (Q_N) в Балтийское море со стоком четырнадцати трансграничных рек и характеристиками их водосборных бассейнов. В качестве дескрипторов были рассмотрены численность населения на водосборе (x_1 , человек), площадь водосборного бассейна (x_2 , км²), расход воды (x_3 , м³/год · 10⁶), плотность населения на водосборе (x_4 , чел./км²), площадь леса на водосборе (x_5 , км²), площадь пахотных угодий на водосборе (x_6 , км²) и площадь кустарников или травянистого покрова (x_7 , км²). Кроме того, в качестве дескриптора была использована площадь водных объектов на водосборных бассейнах рассмотренных рек (x_8 , км²). Было установлено, что наиболее информативными показателями являются численность населения на территории водосборного бассейна и площадь пахотных угодий.

На основе выявленных закономерностей предложено три подхода к квотированию антропогенной биогенной нагрузки на трансграничные водные объекты. Согласно первому подходу, распределение антропогенной биогенной нагрузки между сопредельными государствами

целесообразно рассчитывать пропорционально долям населения на водосборной территории. Второй подход предполагает проведение расчетов пропорционально долям распаханых земель. Третий подход, предложенный эстонскими специалистами, предполагает проведение расчетов пропорционально площадям водосборов (табл. 8).

Таблица 8. Распределение максимально допустимого поступления фосфора общего (ТР) с р. Нарвой в Нарвский залив между Россией и Эстонией, т/год

Принцип квотирования	Российская Федерация	Эстония
Пропорционально численности населения	153	106
Пропорционально площадям распаханых земель	137	122
Пропорционально площадям водосборов	166	78
Среднее	152	102

Наличие рассмотренных проблем во многом обусловлено несовершенством существующих систем нормирования качества природной среды, отсутствием единых подходов в этой сфере. Результаты выполненных в последнее время исследований демонстрируют перспективность решения некоторых из этих проблем.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00683а.

Список литературы

- Гальцова В. В., Дмитриев В. В. Практикум по водной экологии и мониторингу состояния водных экосистем. СПб.: СПбГУ, РГГМУ, 2007. 364 с.
- Кимстач В. А. Классификация качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сообщества. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 48 с.
- Киселев А. В., Фридман К. Б. Оценка риска здоровью. Подходы к использованию в медико-экологических исследованиях и практике управления качеством окружающей среды. СПб.: Международный институт оценки риска здоровью, 1997. 103 с.
- Мостеллер Ф. Пятьдесят занимательных вероятностных задач с решениями. М.: Наука, 1975. 104 с.
- Рыбеков Ю. Х. Трансграничное сотрудничество на международных реках: проблемы, опыт, уроки, прогнозы экспертов / под ред. В. А. Духовного. Ташкент: НИЦ МКВК, 2009. 204 с.
- Семенченко В. П., Разлуцкий В. И. Экологическое качество поверхностных вод. Минск: Белорусская наука, 2011. 329 с.
- Тимофеева Л. А., Фрумин Г. Т. Трансграничные водные объекты. СПб.: СпецЛит, 2017. 159 с.
- Фрумин Г. Т., Тимофеева Л. А. Трансграничные водные объекты и водосборы России: проблемы и пути решения // Биосфера. 2014. Т. 6, № 1. С. 174–189.
- Фрумин Г. Т., Фетисова Ю. А. Трансграничные водные объекты. Проблема оценки качества воды // Коллективная монография по материалам V Междунар. науч.-практ. конф. 27–28 октября 2016 г. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2016. С. 569–571.
- Фрумин Г. Т., Хуан Жань-Жань. Трофическое состояние пресноводных озер Китая // Экологическая химия. 2011. Т. 20, вып. 1. С. 11–16.

ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF TRANSBOUNDARY WATER OBJECTS

G. Frumin

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Three topical problems of transboundary water bodies are considered: the problem of assessing the water quality, the problem of assessing the trophic status of lakes, the problem of quotas for nutrient loads on transboundary water bodies, and possible solutions.

ГЕОГРАФИЯ И ГИДРОЛОГИЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ НЕИЗУЧЕННЫХ ОЗЕР НА ПРИМЕРЕ ВОДОЕМОВ СЕВЕРО-ЗАПАДА РФ

Е. В. Давыденко

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

В работе приведены результаты анализа временных рядов характерных уровней озер, рассчитанные статистические параметры рядов данных наблюдений для групп озер, результаты кластерного анализа.

При решении различных проектных и изыскательских задач в хозяйстве часто приходится сталкиваться с необходимостью определения максимальных значений уровней воды озера различной обеспеченности. Расчет основывается на статистических характеристиках имеющихся рядов, которые используются в качестве аналогов. Поэтому исследование этих характеристик, установление физических причин, обуславливающих закономерности их изменений, является актуальной задачей. К числу таких характеристик следует отнести основные параметры, определяющие кривую распределения и структуру ряда: дисперсию, асимметрию, среднее значение, коэффициент автокорреляции.

Материалы и методы исследования

Для анализа отобраны озера, которые относятся к зоне избыточного увлажнения и отличаются большим разнообразием морфологии котловин, связанных с их происхождением и эволюцией (табл.). В качестве исходных данных использовались ряды среднегодовых, максимальных и минимальных годовых уровней воды за период с 1939 г. по 2017 г., также рассматривались ряды годовых амплитуд уровня воды и морфометрические характеристики озер и их водосборов.

Для выявления примерных дат нарушения режима колебаний уровня воды в результате антропогенного или природного влияния на озеро по имеющимся данным наблюдений были построены хронологические графики многолетнего хода средних, максимальных, минимальных уровней воды, а также амплитуды колебаний уровня воды, которая определялась как разница между максимальным и минимальным значением уровня за год. Для уточнения продолжительности стационарных периодов были построены интегральные кривые. После того, как были установлены даты нарушения уровня режима, ряды разбивались на участки до и после резкого изменения уровня режима водоема, для выполнения условия однородности. В дальнейших расчетах использовались данные за период ненарушенного режима колебаний уровня воды в озере.

Анализ рядов на стационарность был выполнен с помощью критериев Стьюдента и Фишера, основанных на оценке однородности средних и дисперсий сравниваемых отрезков исследуемых рядов [Сикан, 2007].

Для рядов максимальных уровней воды были рассчитаны и проанализированы статистические параметры.

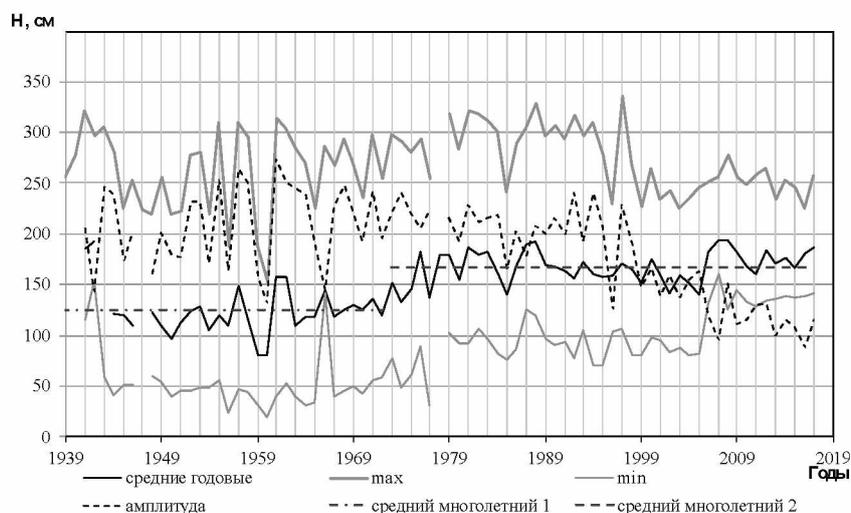
В программе Statistica 10 был выполнен кластерный анализ методом К-средних, в результате которого были классифицированы гидрологические и морфометрические характеристики исследуемых озер. Из совокупности значений площадей удельных водосборов озер, амплитуд колебания уровня воды и координат местоположения самих озер были выделены классы близких по характеру параметров [Догановский, 2007].

Параметры исследуемых озер

№ п/п	Озеро – пост	Период наблюдений	Площадь озера, км ²	Площадь водосбора, км ²
1	Валдайское – г. Валдай	1936–2014	19,7	97,2
2	Ведлозеро – д. Ведлозеро	1936–2017	57,90	619
3	Водлозеро – д. Куганаволок	1941–2017	367	5280
4	Ильмень – д. Войцы	1936–2017	1110	67 200
5	Гимольское – д. Гимолы	1950–1986	80,5	2665
6	Глубокое – д. Корвителино	1948–1986	4,2	30,8
7	Ладожское – р. Нева (п. Петрокрепость)	1881–2017	17 700	276 000
8	Лексозеро – с. Реболы	1948–2017	166	3450
9	Онежское – г. Петрозаводск	1936–2017	9690	62 800
10	Суоярви – г. Суоярви	1948–2017	77	2140
11	Сяберо – д. Сяберо	1936–2017	14,20	48
12	Сямозеро – д. Угмойла	1937–2017	266	1580
13	Тулмозеро – д. Палалахта	1948–2017	14,50	829
14	Черемнепкое – д. Наволок	1938–2000	15	496
15	Чудское	1936–2017	3512	47 800
16	Лиелайс-Лудза	1946–1980	8,464	609
17	Янис-ярви	1948–1986	174,9	3660
18	Щучье – с. Щучье	1981–2017	11,9	298
19	Лижмозеро – д. Кяпсесельга	1946–1994	84,8	620
20	Линдозеро – д. Линдозеро	1936–1986	6,3	1120
21	Охват – д. Бдынъ	1981–2017	13,60	586
22	Самро – д. Усадипе	1936–1975	40,4	86,6
23	Сандал – д. Сопоха	1946–2017	185	6620
24	Остречье – д. Остречье	1973–2013	2,70	8,90
25	Шугозеро – д. Уляница	1969–2017	5,90	98
26	Коробожка – д. Устрека	1944–2017	6,46	1030
27	Лача	1926–2017	351	12 600
28	Воже	1933–1993	422	6260
29	Кен-озеро	1932–1995	68,6	5450
30	Унд-озеро	1938–1990	44,7	709
31	Кубенское – д. Коробово	1931–2016	166	14 700
32	Большое Михайловское – д. Новая Деревня	1966–1996	2	211
33	Лекшм-озеро – д. Орлово	1965–2017	54,4	197
34	Долгое – с. Вершинино	1996–2017	13,2	4630

Результаты и выводы

На некоторых исследуемых озерах (оз. Водлозеро, оз. Тулмозеро, оз. Валдайское, оз. Ведлозеро, оз. Лиелайс-Лудзас) наблюдается нарушение стока и, как следствие, изменение уровня режима, что безусловно ведет к изменению статистических параметров ряда и нарушению стационарности ряда (рис.).



Хронологические графики хода характерных уровней воды и амплитуд оз. Водлозеро

После анализа рядов характерных уровней воды и выявления дат нарушения стока были выделены репрезентативные периоды данных наблюдений, по которым производились дальнейшие расчеты.

По результатам кластерного анализа были выделены три группы озер, которые охватывают значительные районы, отличающиеся условиями увлажнения и особенностями ландшафта. К первой группе относятся водоемы, расположенные на территории Карелии и севере Архангельской области. Котловины этого района относятся преимущественно к тектоническому и ледниково-тектоническому типам происхождения. Ко второй – озера, которые расположены в зоне распространения Московского оледенения. К третьей – водные объекты, находящиеся на юге Архангельской области, озера этой группы, как правило, занимают понижения моренного рельефа, при этом они расположены на разных склонах морены, поэтому имеют различные размеры и форму. Следует отметить, что при проведении данного анализа не учитывались крупные озера, такие, как Ладожское, Онежское, Чудское. Так как они являются уникальными водными объектами, а их водосборы носят полизональный характер, их уровеньный режим рассматривался отдельно.

Затем для каждого из выделенных районов были построены зависимости амплитуд уровней воды от площади удельных водосборов озер $A = f(AF)$ [СП 33-101-2003, 2004]. Полученные зависимости оказались недостаточно репрезентативными, что говорит о необходимости уточнения районирования территории. В дальнейшем исследовании будет проведено уточнение полученных зависимостей и выделенных групп озер.

Также предполагается, что по полученным зависимостям для каждого из районов, при наличии сведений о площади удельного водосбора конкретного озера, можно определить среднегодовалый подъем уровня воды в водоеме.

Для всех рядов максимальных уровней воды были рассчитаны значения коэффициента асимметрии C_s и приведенного коэффициента вариации \tilde{C}_v , который рассчитывался по формуле $\tilde{C}_v = \frac{CKO}{\bar{A}}$, где CKO – среднее квадратическое отклонение, \bar{A} – средняя многолетняя амплитуда колебаний уровня воды озера. Приведенный коэффициент вариации рассчитывался для того, чтобы \tilde{C}_v не зависел от нуля графика и была возможность обобщить данные групп озер. Для первого района коэффициенты C_s варьируются в диапазоне от $-2,15$ до $1,21$; \tilde{C}_v от $0,09$ до $0,56$. Для второго района коэффициенты C_s варьируются в диапазоне от $-0,96$ до $1,22$; \tilde{C}_v от $0,50$ до $0,10$. Для третьего района коэффициенты C_s варьируются в диапазоне от $0,13$ до $0,61$; \tilde{C}_v от $0,18$ до $0,25$.

Предполагается, что при обобщении полученных характеристик для морфологически однотипных озер их можно использовать в дальнейшем при определении параметров кривых обеспеченности Пирсона III типа для групп озер одинакового происхождения, которые были выделены ранее. Таким образом можно перейти к максимальным уровням различной обеспеченности, что имеет крайне важное значение при инженерных изысканиях.

Исследование выполнено в рамках написания диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук.

Список литературы

Догановский А. М. Уровеньный режим озер – интегральный показатель климатических и экологических изменений // Общество, среда, развитие. 2007. № 1. С. 103–110.

Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 279 с.

СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М., 2004. 73 с.

CALCULATION OF MAXIMUM WATER LEVELS OF UNEXPLORED LAKES: LAKES OF NORTH-WEST RUSSIA AS AN EXAMPLE

E. Davydenko

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

The paper presents the results of an analysis of the time series of characteristic lake levels and the relationships revealed for the selected areas.

ОЦЕНКА МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ПЛОЩАДЕЙ ОЗЕР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

Н. Ю. Корнеевкова

Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург

С использованием данных космической съемки исследована временная изменчивость морфометрических характеристик озер юга Западной Сибири. В целях изучения многолетней динамики площадей водной поверхности проанализированы снимки Landsat с пространственным разрешением 30 м за 1988, 1995 и 2009 гг. На основе обработки разновременных спутниковых снимков получены значения коэффициентов озерности для тестовых участков, расположенных на востоке Курганской области в регионе недостаточного увлажнения. Для водоемов зоны водного дефицита характерна значительная изменчивость площади зеркала как во внутригодовом, так и в многолетнем разрезе. Применение материалов космической съемки за разные периоды водности позволяет производить уточнение результатов выполненных ранее оценок озерных ресурсов РФ.

Территории юга Западной Сибири Российской Федерации относятся к зоне недостаточного увлажнения, характеризующейся значительной пространственно-временной многолетней и внутригодовой динамикой ресурсов озерных вод. В настоящее время отмечается существенный недостаток информации о количественных значениях временного изменения уровней воды озер регионов водного дефицита на фоне современных изменений климатических условий. Применение спутниковых снимков за различные сезоны года и периоды водности может восполнить ограниченность данных гидрометрических измерений на территориях водного дефицита.

В течение нескольких лет в Институте озераведения Российской академии наук проводилась новая оценка ресурсов озерных вод Российской Федерации. Она выполнялась на основе современных космических снимков с применением единой, специально разработанной методики, основанной на использовании возможностей программы «Google Планета Земля» [Измайлова, 2016]. В ходе оценки производились подробный количественный подсчет водоемов по градациям крупности и измерение площадей их водной поверхности. В рамках работ выполнялся расчет показателей озерности.

Озерность – отношение суммарной водной поверхности озер и искусственно созданных водоемов к площади рассматриваемой территории. Анализ показателя озерности территории является наиболее удобным для оценки пространственной неоднородности распределения озерных водных ресурсов [Измайлова, 2016]. Данная характеристика дает общее представление о площади водного покрытия региона и позволяет получить наглядную информацию о пространственном распределении озер.

Для регионов, расположенных в пределах зоны неустойчивого и недостаточного увлажнения, значения коэффициентов озерности в разные сезоны и в разные по водности годы могут отличаться от средних величин, рассчитанных в ходе проведенной ранее оценки. Применение материалов космической съемки за разные периоды водности позволяет производить уточнение полученных в ИНОЗ РАН результатов.

Среди всех регионов водного дефицита, расположенных в пределах России, юг Западной Сибири является одним из наиболее обеспеченных озерными водными ресурсами [Измайлова, Корнеевкова, 2020].

Ранее на примере водоемов юга Тюменской области были начаты исследования внутригодовой динамики морфометрических характеристик озер регионов недостаточного увлажнения [Корнеевкова, Измайлова, 2018]. Оценка многолетней изменчивости ресурсов озерных вод выполнялась на основе анализа площадей водоемов Курганской области.

В целях изучения динамики морфометрических характеристик озер были проанализированы снимки TM/Landsat 5 уровня обработки Level-1 с пространственным разрешением 30 м, полученные посредством сервиса Earth-Explorer (<http://Earthexplorer.usgs.gov/>). Обработке были подвергнуты сцены Landsat 5 за близкие даты съемки – начало сентября 1988 г., 1995 г. и 2009 г.

На основе анализа спутниковой информации рассчитывались изменения площадей водоемов на каждую дату в пределах семи тестовых участков размером 10×10 км (рис. 1) на востоке Курганской области. При выборе границ тестовых площадей учитывались уже имеющиеся исследования. Границы участков № 1–6 соответствуют полигонам, выделенным при оценке ИНОЗ РАН. В связи с тем, что для уточнения уже проведенной оценки и дальнейшей визуализации пространственной и временной неоднородности озерного водного покрытия целесообразно введение дополнительных площадей, были проанализированы морфометрические характеристики водоемов в пределах дополнительного фрагмента № 12.

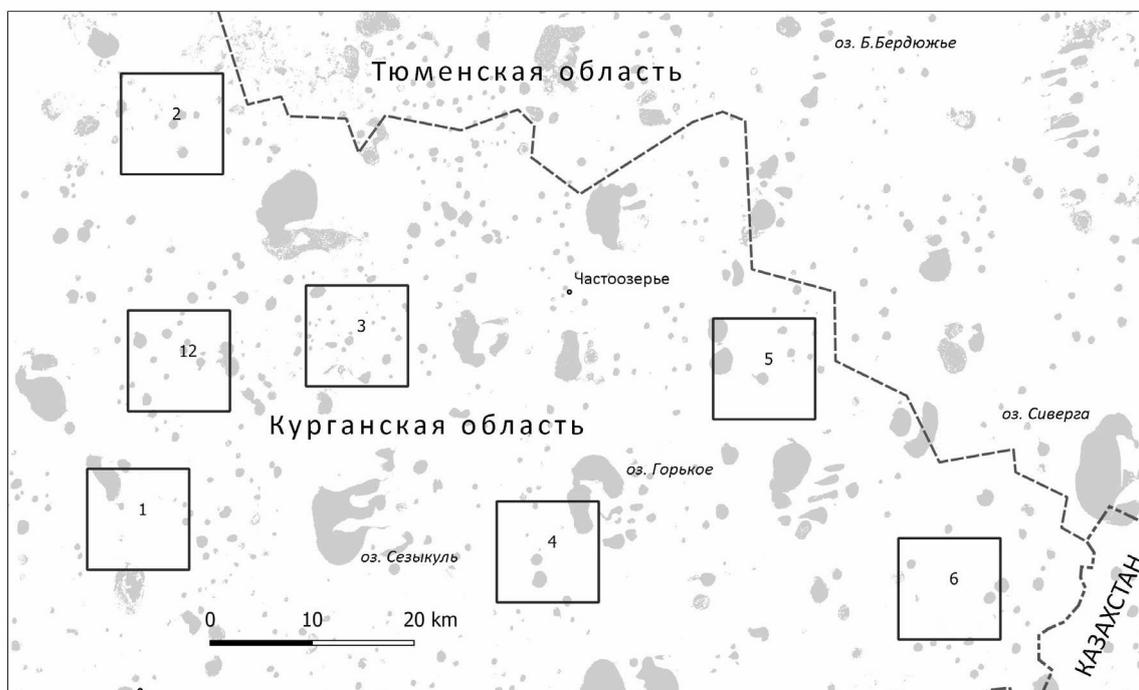


Рис. 1. Район исследований

Озера исследуемых участков приурочены к Тоболо-Ишимской лесостепи, представляющей собой плоскую равнину со средними высотами около 100 м [Городецкая, 1972].

При исследовании динамики площадей озер применялось автоматическое дешифрирование с использованием многоканального водного индекса MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) [Xu, 2006; Курганович, 2015]:

$$MNDWI = b2 - b5/b2 + b5,$$

где $b2$, $b5$ – интенсивность излучения в спектральных каналах 2 и 5 TM/ETM+/Landsat.

Обработка снимков и вычисление площадей водного покрытия производились в программной среде QGIS. Работа включала несколько этапов: предварительная обработка снимков (географическая привязка); вычисление многоканального водного индекса MNDWI; преобразование растрового изображения в полигональный векторный слой; коррекция геометрии методом визуального дешифрирования; вычисление площадей полигонов, соответствующих водным поверхностям.

На основе полученных данных рассчитаны коэффициенты озерности для периодов различной водности для каждого тестового участка (рис. 2).

Как показывают результаты обработки снимков Landsat, в сентябре 1995 г. коэффициенты озерности шести участков (№ 1–6) превышают величины, рассчитанные в ходе проведенной ранее в Институте озераедения РАН оценки. В сентябре 2009 г. показатели озерности ниже для участков № 1, № 4 и № 6, выше – для фрагментов № 3 и № 5. Коэффициенты озерности в 1988 г. для четырех тестовых участков (№ 1, 3, 4, 6) ниже, для одного участка (№ 5) – выше установленных ранее в ИНОЗ РАН значений.

Разница показателей озерности в многоводный (1995) и маловодный (1988) годы для двух тестовых площадей (№ 3 и № 4) превышает 3 %, для участков № 1 и № 5 составляет около 1 %, для участков № 6 и № 12 – менее 0,3 % (см. рис. 2, 3).

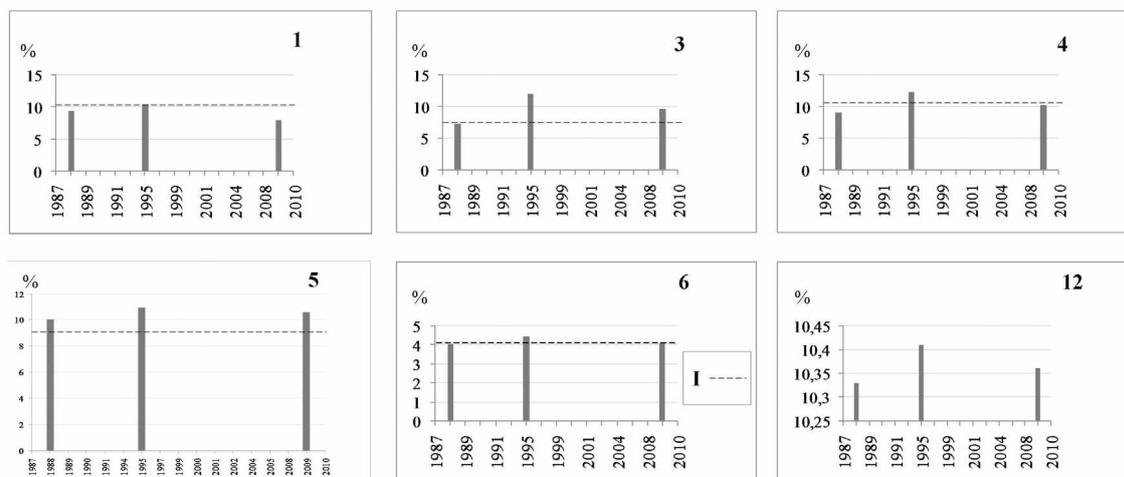


Рис. 2. Коэффициенты озерности тестовых участков в 1988, 1995 и 2009 гг.:

I – показатель озерности по результатам проведенной ранее оценки [Измайлова, 2016]

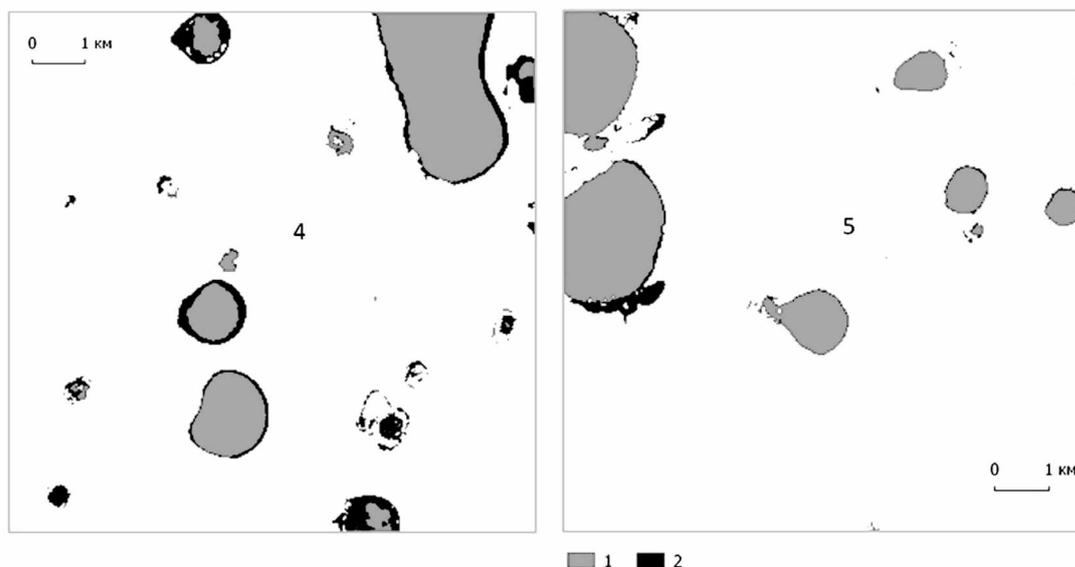


Рис. 3. Изменение площадей и количества водоемов фрагментов № 4 и № 5:

1 – площадь водной поверхности в сентябре 1988 г.; 2 – увеличение площади в сентябре 1995 г. по сравнению с сентябрем 1988 г.

Проведенные исследования показали перспективность применения космической информации для анализа временной изменчивости морфометрических характеристик озер южной части Западной Сибири.

Использование снимков за различные периоды водности, а также введение дополнительных тестовых площадей не только уточняют результаты проведенной ранее в ИНОЗ РАН оценки, но и могут быть полезны при дальнейшей визуализации пространственной и временной неоднородности озерного водного покрытия регионов водного дефицита.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по темам № 0133-2019-0004 «Закономерности распределения озер по территории Евразии и оценка их водных ресурсов» и № 0133-2019-0005 – ПрРАН № 13 «Пространственная неоднородность озерно-ресурсного потенциала России, прогноз тенденций изменения озерного фонда с учетом социально-экономического развития регионов».

Список литературы

- Городецкая М. Е. Морфоструктура и морфоскульптура юга Западно-Сибирской равнины. М.: Наука, 1972. 153 с.
- Измайлова А. В. Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14. doi: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-4(5-14).
- Корнеевкова Н. Ю., Измайлова А. В. Изучение пространственной и временной неоднородности озера водного покрытия регионов недостаточного увлажнения по космическим снимкам // Материалы Междунар. конф. ИнтерКарто/ИнтерГИС-24, Петрозаводск, 19–22 июля 2018 г. С. 106–115.
- Курганович К. А., Носкова Е. В. Использование водных индексов для оценки измерения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестн. ЗабГУ. 2015. № 06(121). С. 16–23.
- Izmailova A. V., Korneenkova N. Yu. Lake Area Percentage in Russian Federation Territory and Its Governing Factors // Water Resources. 2020. Vol. 47, N 1. P. 13–21. doi: 10.1134/S009780782001008X.
- Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. N 27. P. 3025–3033.

ASSESSMENT OF THE LONG-TERM DYNAMICS OF THE LAKE AREAS IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA USING SATELLITE IMAGES

N. Korneenkova

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg

The temporal variability of the morphometric characteristics of lakes in the south of Western Siberia was studied using satellite images. We analyzed Landsat imagery with a spatial resolution of 30 m obtained in 1988, 1995 and 2009 to study the long-term dynamics of the lake areas. Having processed images from different times, we obtained the values of lake area percentage in the pilot sites situated in low-moisture regions. Water bodies lying in a moisture-deficient zone show considerable variations in lake water area both within a year and on a long-term scale. The analysis of satellite imagery covering periods with different water content helps refine the results of previous assessments of lake resources in the Russian Federation.

ИЗУЧЕНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ ДОЛИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. А. Ломов

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

В настоящее время активно изучается проблема глобального потепления. Один из основных парниковых газов в атмосфере – это метан. Происхождение метана может быть как природное, так и антропогенное. Важным антропогенным источником являются водохранилища. В данной работе представлены результаты исследований потоков метана на Можайском водохранилище с 2015 по 2019 г. Наиболее детальные измерения проводились в летний период, когда отмечается наибольшая изменчивость потоков метана. Исследования показали, что наибольшие значения потоков метана в атмосферу (до 20 мгС/м²*час) наблюдаются при значительном ветро-волновом перемешивании водоема, а также осенью, перед началом стадии конвективного перемешивания из-за охлаждения. Кроме того, поток метана рассчитывался по модели LAKE. Результаты моделирования сопоставлялись с измерениями *in situ* для калибровки параметров модели.

Метан – один из главных парниковых газов в атмосфере после водяного пара и диоксида углерода. Согласно докладом IPCC [Forster et al., 2007] потенциал глобального потепления метана равен 72 (для 20-летнего периода), а так как его содержание в атмосфере невелико (0,00018 %), даже не-

большое изменение его содержания может привести к серьезным последствиям. Источников метана в атмосфере множество, и они могут быть как природного, так и антропогенного характера. К крупным природным источникам метана относятся болота, лесные экосистемы (особенно тропического региона), Мировой океан и др. Антропогенные источники – свалки ТБО, рисовые поля, пастбища крупного рогатого скота, а также искусственные водоемы [Deemer et al., 2016].

Существует множество различных оценок общей эмиссии метана в атмосферу с поверхности искусственных водоемов. Они базируются на разделении водохранилищ по природным зонам, средней глубине, проточности, трофности и другим показателям. По этим расчетам на водохранилища приходится от 2,4 до 122 Тг в год (это 0,5–10 % от общей эмиссии метана в атмосферу) [Tremblay et al., 2005; Tortajada et al., 2012; Deemer et al., 2016].

Метан как элемент водной экосистемы. Основной источник метана в водохранилище – это разложение органического вещества в грунтах при отсутствии кислорода. Метан, который поднимается от придонных слоев воды к поверхности, попадает в атмосферу двумя основными путями – пузырьковым и диффузионным [Bastviken et al., 2010].

Диффузионный поток более медленный и зависит прежде всего от разницы концентраций между соседними горизонтами. Из-за молекулярной природы диффузионного потока он имеет очень небольшую скорость, его значения обычно невелики в поверхностных горизонтах водной толщи. Связано это с тем, что растворенные в воде молекулы метана подвержены окислению организмами – метанотрофами. Отличие пузырькового потока в том, что он достигает поверхности значительно быстрее диффузионного и не подвержен окислению, так как молекулы метана из-за сил поверхностного натяжения недоступны для микробиологических процессов. Пузыри газа образуются только при перенасыщении воды растворенным метаном.

Объект и методы исследования

Можайское водохранилище было создано в 1960 г. в верховьях р. Москвы. Это типичное водохранилище долинного типа. Его характеристики приведены в табл.

Морфологические характеристики Можайского водохранилища
(все характеристики приведены для НПУ) [Эдельштейн, 2014]

Длина	Наиб. ширина	Сред. ширина	Наиб. глубина	Площадь	Объем	Колебания уровня	Кэф. водообмена
28 км	2,6 км	1,1 км	22,6 м	30,7 км ²	0,24 км ³	6 м за год	1,78

Основные пять станций наблюдений над затопленным речным руслом были выбраны для изучения пространственной неоднородности потоков метана в водоеме (рис. 1).

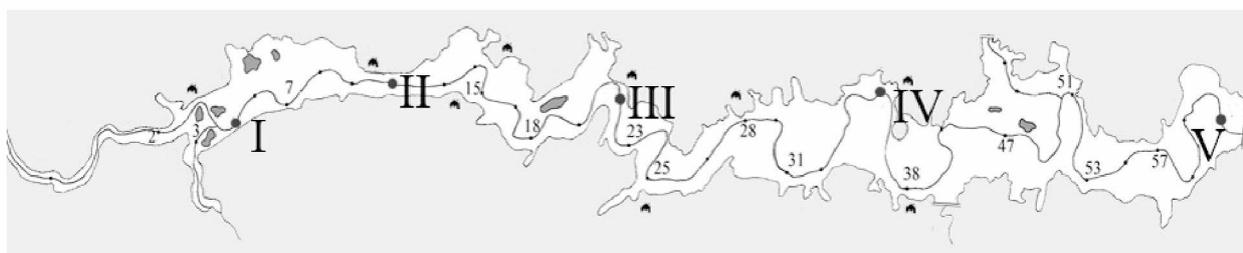


Рис. 1. Схема Можайского водохранилища с опорными станциями измерений над затопленным руслом

Глубины станций от I до V составляют: 5 м, 7 м, 9 м, 14 м и 20,5 м, соответственно (при НПУ). Основные наблюдения проводились в летний период с 2015–2019 г., так как именно в это время наблюдается наибольшая изменчивость потоков метана. Работы включали в себя гидролого-гидрохимические съемки для пространственного охвата всего водоема (осуществлялись несколько раз за летний период) и рейдовые наблюдения с большей регулярностью на станции IV. Измерения на каждой станции состояли из отбора проб для последующего определения концентрации метана в воде, определения потоков на границе вода – атмосфера методом «плавающих камер» [Bastviken et al., 2010] и на границе донные отложения – вода методом трубок Кузнецова – Романенко [Sweerts et al., 1991].

Результаты и их обсуждение

Изменения потоков метана на границах донные отложения – вода и вода – атмосфера за 2018 и 2019 гг. представлены на рис. 2, 3.

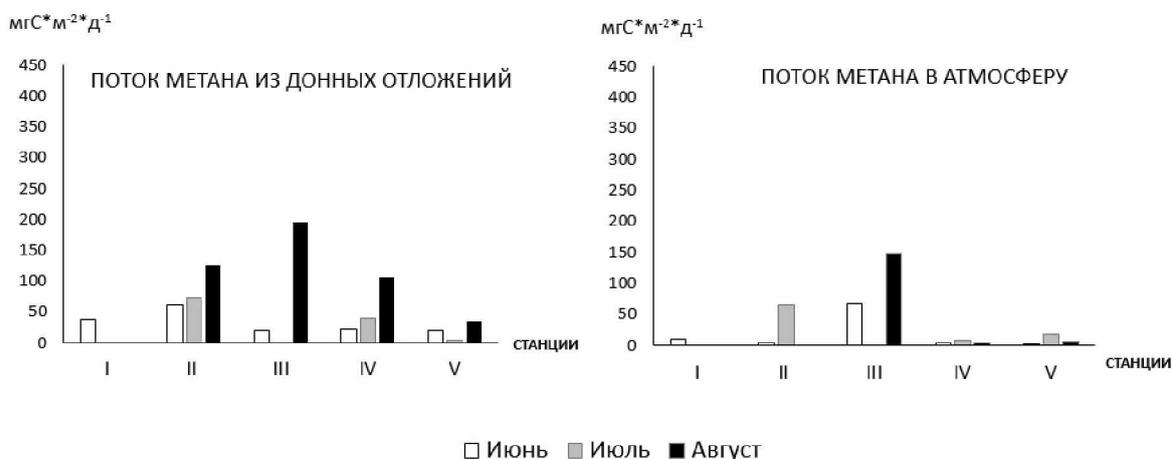


Рис. 2. Пространственно-временная изменчивость потоков метана на основных станциях измерений за летний период 2018 г.

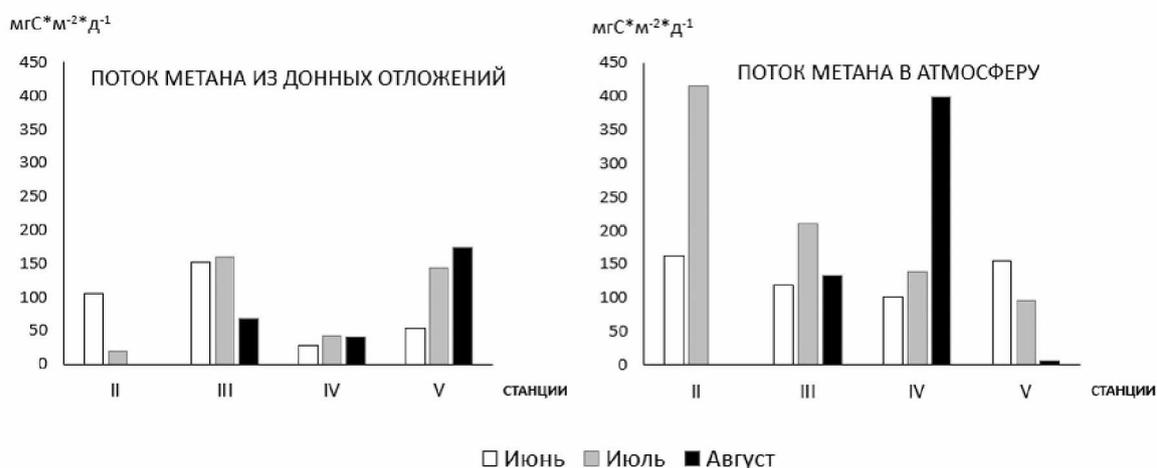


Рис. 3. Пространственно-временная изменчивость потоков метана на основных станциях измерений за летний период 2019 г.

Как правило, в течение летнего периода отмечается увеличение потоков метана [Гречушников и др., 2017]. Это наблюдалось в 2018 г. на всех станциях наблюдений. Связано это с тем, что в течение лета 2018 г. в водохранилище была устойчивая температурная стратификация, сформировавшаяся еще в начале июня. Из-за этого в гипolimнионе образовалась устойчивая зона дефицита кислорода, что способствовало выходу метана из грунтов. Наибольшее значение потока метана из донных отложений наблюдалось на станции III в августе (196 мгС/м²*день) (см. рис. 2). Максимум именно в этом районе обусловлен наилучшими условиями для образования метана: глубина станции 9 м, что достаточно для установления температурной стратификации и аноксии у дна, но не слишком глубоко, чтобы большая часть органического вещества окислялась в самой водной толще. По этой причине на станциях ближе к плотине потоки метана невелики. Поток в атмосферу меньше, чем поток из донных отложений, так как часть метана окисляется в водной толще, однако возможно превышение потока в атмосферу над потоком из грунта. Это наблюдается при значительном преобладании пузырькового потока метана над диффузионным. Метод трубок для определения потока из донных отложений позволяет учитывать в основном диффузионную составляющую в то время, как «плавучие камеры» измеряют обе составляющие потока.

Особенно заметно превышение потоков метана в атмосферу над потоками из грунта в 2019 г. Синоптические условия в летний период этого года значительно отличались от предыдущего года. Наблюдалось несколько мощных холодных атмосферных фронтов, после прохождения которых из-за сильного ветра разрушалась температурная стратификация. Перемешивание водной толщи способствовало поступлению накопившегося в гипolimнионе метана к поверхности и интенсифицировало пузырьковый поток метана, так как меньше пузырьков растворилось в водной толще. Наибольшие значения потока наблюдались на станции II в июле (415 мгС/м²*день) (см. рис. 3), при этом в данном районе из-за небольшой глубины вся водная толща была насыщена кислородом, поэтому такое высокое значение достигалось за счет пузырьковой составляющей (измерения показали, что ее вклад может достигать 97 %). Важно учитывать и уровень режим водохранилища – уровень в 2019 г. был ниже, чем в 2018 г., на 2–3 м. Из-за этого высокие значения потока метана в атмосферу наблюдаются на станции IV, а не на станции III, как в 2018 г.

По результатам наблюдений на рейдовой вертикали IV были построены графики изменения потока метана в атмосферу за летние периоды 2015–2019 гг. (рис. 4).

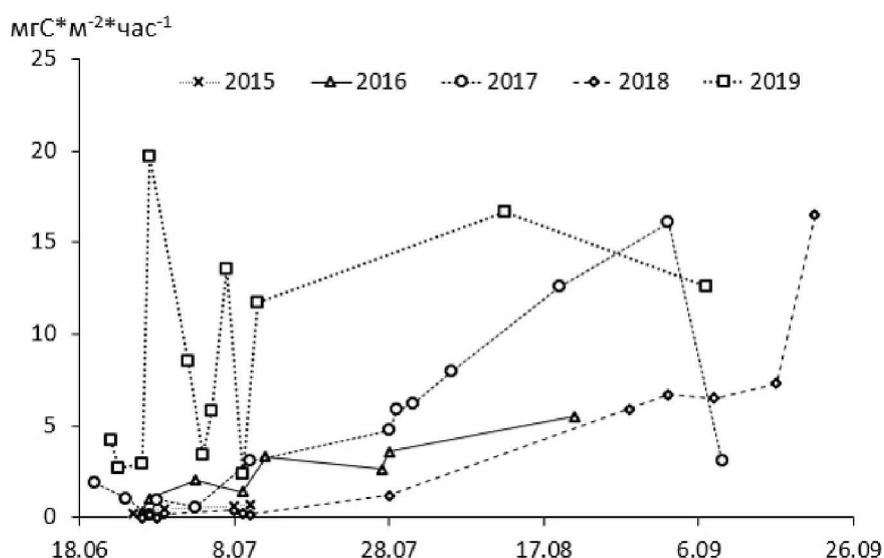


Рис. 4. Изменение потока метана в атмосферу в течение лета на станции наблюдений IV

Как можно видеть из рис. 4, для большинства лет наблюдений поток метана в начале летнего периода незначителен. При устойчивой температурной стратификации эмиссия от июня к августу возрастает медленно, при постепенном ослаблении стратификации (как в 2017 г.) или же поток остается незначительным до момента резкого разрушения устойчивости осенью (2016 и 2018 гг., однако пика и дальнейшего уменьшения эмиссии в эти годы зафиксировать не удалось). Сильно выделяется из общей закономерности 2019 г. Из-за очень сильного и быстрого перемешивания, вызванного атмосферным фронтом в конце июня, максимум потока в атмосферу (19,7 мгС/м²*ч) наблюдался в это время. Весь метан, накопившийся с начала установления стратификации в массе в придонных горизонтах воды, резко эмиссировал в атмосферу, также значительный вклад был внесен и пузырьковым потоком.

Дискретности полевых измерений бывает недостаточно для получения детальной картины о пространственно-временной неравномерности потоков метана, решить это можно с помощью математического моделирования. При этом калиброваться модель может именно по результатам полевых работ на водохранилище. Для таких целей была выбрана одномерная гидродинамическая модель LAKE [Stepanenko et al., 2016]. В нее включен блок расчета образования метана в донных отложениях, его окисления в водной толще и эмиссии в атмосферу. Входными данными в модель служит метеорологическая информация о температуре, влажности воздуха, скорости ветра, проходящей коротковолновой и длинноволновой солнечной радиации и осадках. В настоящее время ведутся расчеты по этой модели с различными входными данными (используются данные реанализа и различные наземные метеорологические наблюдения) для выбора наиболее оптимального варианта. В дальнейшем планируется применение данной модели и на других водных объектах.

Таким образом, структура потоков метана в атмосферу в долинном водохранилище имеет сложную пространственно-временную изменчивость. Наибольшие изменения потока наблюдаются в летний период – его значения возрастают в течение лета и достигают максимума перед началом стадии осеннего перемешивания водоема. Кроме того, значительные выбросы метана могут происходить при сильном ветро-волновом воздействии. Для более точных оценок будут использованы расчеты с помощью математической модели LAKE, применение которой поможет получить оценки эмиссии метана с других менее исследованных водоемов.

Выражаю благодарность сотрудникам Красновидовской УНБ за предоставленное оборудование и помощь в полевых исследованиях, сотрудникам Института Физики Атмосферы И. А. Репиной за научные консультации и В. С. Казанцеву за помощь в лабораторных исследованиях, сотруднику кафедры метеорологии и климатологии В. М. Степаненко за помощь в работе с моделью LAKE.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента России МД-1850.2020.5.

Список литературы

Гречушников М. Г., Бадюков Д. Д., Саввичев А. С., Казанцев В. С. Сезонные и пространственные изменения содержания метана в Можайском водохранилище в летний период // Ростов-на-Дону: Метеорология и гидрология. 2017. № 11. С. 67–78.

Эдельштейн К. К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: «Перо», 2014. 399 с.

Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // N. Y.: Environmental science & technology. 2010. Vol. 44. P. 5450–5455.

Deemer R., Harrison A., Li S., Beaulieu J., Delsontro T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // Springer. BioScience. 2016. Vol. 66, N 11. P. 949–964.

Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P. et al. Changes in atmospheric constituents and in Radiative Forcing // Asses. Report of the IPCC. Cambridge University Press. Cambridge, 2007. P. 129–217.

Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // EGU: Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. P. 1977–2006.

Sweerts J., Bar-Gilissen M., Cornelse A., Cappenberg T. Oxygen-consuming processes at the profundal and littoral sediment – water interface of a small meso-eutrophic lake // Petrozavodsk: Limnol. Oceanogr. 1991. Vol. 36, N 6. P. 1124–1133.

Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A Global Assessment / Berlin: Water Resources Development and Management. 2012. P. 410.

Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes / Berlin: Springer, 2005. 732 p.

RESEARCH ON METHANE EMISSIONS FROM A VALLEY-BASED STORAGE RESERVOIR BY MATHEMATICAL MODELING METHODS

V. Lomov

Lomonosov Moscow State University, Moscow

The global warming issue is being intensely studied nowadays. One of the main greenhouse gases in the atmosphere is methane. Methane comes from both natural and anthropogenic sources, and storage reservoirs are an important anthropogenic source. This article presents the research results on methane fluxes at Mozhaiskoye Reservoir from 2015 to 2019. The most detailed measurements were carried out in summer, when the variation of methane fluxes is the highest. Studies have shown that methane fluxes into the atmosphere (up to $20 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) are the highest during significant wind-wave mixing of the reservoir, as well as in autumn, before the onset of convective mixing due to cooling. Also, the methane flux was calculated using the LAKE model. The modelling results were compared with *in situ* measurements to calibrate the model parameters.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЗЕРА СИСЬЯРВИ (ВАЛААМСКИЙ АРХИПЕЛАГ, ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО)

Н. В. Панова¹, Е. Ю. Воякина^{1, 2}

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург

Работа проводилась на Валаамском архипелаге, расположенном в ультрапрофундальной зоне Ладожского озера. Цель исследования – анализ лимнологических особенностей озера Сисьярви, самого крупного водоема Валаамского архипелага. Исследования проводили в период с мая – июня по сентябрь 2013–2019 гг. по основным лимнологическим параметрам. Пробы отбирались в трех глубоких точках озера, отличных с гидрологической точки зрения. В летний период на этих станциях формируется четко выраженная температурная стратификация. Показано, что наибольшая вариабельность характерна для таких параметров, как мутность и содержание биогенных элементов.

Исследование проводилось на Валаамском архипелаге, который расположен в северо-восточной части Ладожского озера. В него входят более 50 островов, включая такие острова, как Валаам, Предтеченский, Емельяновский и Скитский. Общая площадь архипелага составляет 36 км². На архипелаге находится 11 малых лесных разнотипных озер, самое крупное из которых – оз. Сисьярви. Водоем расположен в северо-западной части острова, соединен протоками с Ладожским озером и имеет площадь 80,5 га. Максимальная глубина водоема – 19,0 м, средняя составляет 7,0 м [Гагарин и др., 1998]. Оз. Сисьярви, как и все остальные озера Валаамского архипелага, появилось в результате резко выраженной расчлененности рельефа, обусловленной тектоническим происхождением архипелага и деятельностью ледника, и расположено в межсельговых понижениях. Котловина озера ориентирована в северо-северо-западном направлении.

Особенности гидрологии и гидрохимии озера обусловлены сильной изрезанностью береговой линии, наличием глубоких узких заливов и открытых плесов. Берега – возвышенные, во многих местах образованы отвесными скалами, покрыты преимущественно сосняками [Куликова и др., 1983]. Глубина сильно колеблется, характерны резкие перепады от 6 до 12 м.

Озеро образовано шестью заливами. Три из них вытянуты на северо-запад от его центра, три – на юго-восток. Все они отличаются по морфометрии и гидрологическим характеристикам. Наибольшим по площади является Московский залив с максимальными глубинами. Протяженность – 1520 м, ширина в центральной части 240 м. Залив связан с Ладожским озером через две протоки. Особенности микрорельефа берегов (значительные высоты, создающие эффект аэродинамической трубы) и «открытость» ветрам преобладающих направлений создают условия для активного перемешивания водных масс. Скитский залив глубоко врежется в Скитский остров и защищен со всех сторон плотно сомкнутым еловым лесом. С центральной частью озера залив связан узкой мелководной зарастающей протокой (ширина 50 м, глубина 3 м, длина 500 м). Глубины в центральной части залива – до 12 м. Все это создает особый динамический режим, отличающий залив от других участков озера.

Центральная часть озера (пролив Сисясалми) – открытая, небольшая по площади, ориентирована с запада на восток, с максимальными глубинами 10–11 м. На востоке оз. Сисьярви связано с Ладожским озером через Монастырскую бухту [Воякина, 2007]. На берегу озера, недалеко от его центральной части, находится монастырская животноводческая ферма, которая оказывает негативное влияние на эту часть водоема.

Цель работы – анализ лимнологических параметров трех глубоководных заливов оз. Сисьярви.

В работе использованы данные лимнологических параметров, полученные для трех глубоких станций, расположенных в северных заливах (Московский и Скитский) и центральной части (пролив Сисясалми) оз. Сисьярви, отличных с гидрологической точки зрения. Отбор проб осуществлялся раз в месяц с мая – июня по сентябрь 2013–2019 гг.

В летний период на этих станциях формируется температурная стратификация. Разница между температурой поверхности и придонным горизонтом в разные годы превышала 10,0 °С. За период исследования температура на поверхности воды Московского залива была в диапазоне от 5,2 до 25,5 °С, на дне – от 4,5 до 6,2 °С. В проливе Сисясалми максимальное значение за период

наблюдения на поверхности составило 26,3 °С, минимальное – 6,2 °С. На дне максимальное значение было 6,9 °С, минимальное – 4,5 °С. В Скитском заливе значения температуры на поверхности были в диапазоне от 9,4 до 25,6 °С. Минимальное значение на дне составило 4,0 °С, максимальное – 5,0 °С. Разброс значений связан с различной глубиной точек наблюдения и различными погодными условиями в период наблюдений [Воякина, 2007].

Среднесезонные значения прозрачности на станциях варьировали незначительно (от 1,1 до 2,7 м). Минимальные значения прозрачности на всех станциях наблюдались в 2016 г. Основной причиной снижения прозрачности могло быть жаркое лето, штилевые условия, что в свою очередь привело к увеличению уровня вегетации фитопланктона.

По значениям рН (6,9–8,5) озеро относится к нейтрально-олигощелочным. Кислородный режим не всегда благоприятный, содержание растворенного кислорода на поверхности варьировало значительно (65–107 %). В июле – августе содержание растворенного кислорода часто было менее 90 %. На дне наблюдался дефицит кислорода, в период ярко выраженной температурной стратификации отмечены заморные явления. Наиболее часто они наблюдались в Скитском заливе и проливе Сисясалми.

Минимальные среднесезонные значения мутности на поверхности станций фактически не отличались (от 2,2 до 2,6 мг/дм³). Максимальные значения варьировали от 7,3 мг/дм³ (Скитский залив) до 10,7 мг/дм³ (пролив Сисясалми).

Среднесезонные значения содержания аммонийного азота в поверхностных горизонтах на станциях отличались между собой незначительно: в проливе Сисясалми – 0,49–0,61 мг/дм³, в Московском заливе – 0,42–0,69 мг/дм³, в Скитском заливе – 0,28–0,76 мг/дм³. В придонных горизонтах содержание аммонийного азота в проливе Сисясалми (0,8–1,4 мг/дм³) было выше по сравнению с Московским заливом (0,4–0,7 мг/дм³). В Скитском заливе содержание аммония колебалось от 0,39 до 4,0 мг/дм³.

За время исследования концентрация фосфатов в оз. Сисьярви на поверхности изменялась в диапазоне 0,000–0,017 мг/дм³. По содержанию фосфатов исследованные участки фактически не отличались. Минимальные значения фосфатов наблюдались в Скитском, максимальные – в Московском заливе. Наиболее широкий диапазон значений был отмечен в Скитском заливе (0,000–0,015 мг/дм³).

В придонном слое высокие значения фосфатов были характерны для станций Сисясалми (0,126–0,746 мг/дм³) и Скитского залива – 0,127–0,786 мг/дм³. В Московском заливе значения были на порядок меньше (0,008–0,075 мг/дм³).

Активному накоплению биогенных элементов в придонных горизонтах способствуют такие факторы, как ярко выраженная температурная стратификация, низкая температура, отсутствие кислорода и слабая вегетация фитопланктона.

Таким образом, несмотря на разницу в морфометрических и гидрологических особенностях исследованных участков оз. Сисьярви, показаны незначительные пространственные различия для большинства параметров. Более высокие значения биогенных элементов и мутности в проливе Сисясалми и Скитском заливе, скорее всего, вызваны разными причинами. В первом случае это связано с расположением рядом с местом отбора проб антропогенных источников – монастырской фермы и Смоленского скита, во втором случае это можно объяснить особенностями рельефа и расположением залива, незначительным перемешиванием и замедленным водообменом с основной частью озера. Основные различия оз. Сисьярви с прибрежной зоной Ладожского озера в районе Валаамского архипелага, с которой оз. Сисьярви соединено двумя протоками, связаны в первую очередь с температурным режимом, различиями в морфометрии, а также динамикой водных масс. Валаамский архипелаг из-за своего расположения в глубоководном и холодноводном районе Ладожского озера большую часть вегетационного сезона омывается холодными водами, в редкие годы вода на поверхности открытых участков побережья прогревается до 17,0 °С. В период максимального прогрева воды значения прозрачности в этой части Ладожского озера были минимальны и варьировали от 2,4 до 3,6 м. Кислородный режим более благоприятный, чем в оз. Сисьярви, процент насыщения обычно более 100–110 %. Содержание биогенных элементов на порядок ниже, чем в оз. Сисьярви [Воякина, 2007]. В то время как в летний период поверхностные слои оз. Сисьярвигреваются быстрее и значительнее, характерны более низкие значения прозрачности и содержания растворенного кислорода. Кроме того, в оз. Сисьярви, в отличие от Ладожского озера, в июле – августе прослеживается значительный вертикальный градиент по большинству исследованных параметров.

Для сравнения оз. Сисьярви с озерами материковой Карелии были выбраны водоемы, имеющие сходные морфометрические характеристики – оз. Пряжинское, озера Заонежья и оз. Вендюрское [Жононова, Рыжиков, 2006; Кравченко, 2016]. По кислородному режиму, значениям рН,

заморным явлениям в придонных горизонтах в летний период эти озера похожи, в то время как содержание биогенных элементов в оз. Сисъярви было на порядок выше. Это напрямую связано с тектоническим происхождением Валаамского архипелага, так как породы, слагающие острова архипелага, отличаются от кислых пород Балтийского щита повышенным содержанием оксидов кальция, магния, фосфора и высоким содержанием оксидов железа [Матинян, Урусевская, 1999; Шешукова и др., 2006]. Кроме того, некоторые участки оз. Сисъярви подвержены антропогенному воздействию, что также повышает содержание биогенных элементов.

Список литературы

- Воякина Е. Ю.* Фитопланктон Валаамского архипелага и прилегающей акватории Ладожского озера: дисс. к.б.н.: 03.00.18. СПб., 2007. 245 с.
- Гагарин А. П., Маринич М. А., Карпов А. С.* Природные условия Валаамского архипелага // Комплексные природоведческие исследования на Северо-Западе России: Валаамская и Кургальская экспедиции СПбОЕ: сб. науч. тр. СПб.: СПбОЕ, 1998. Т. 92. Вып. 1. С. 9–16.
- Кононова М. С., Рысаков А. В.* Химический состав воды озера Пряжинское // Водная среда Карелии: исследование, использование, охрана: Материалы II республиканской школы-конференции молодых ученых. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 74–77.
- Кравченко И. Ю.* Химический состав воды малых озер разнотипных ландшафтов Карелии // Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации». 2016. № 12(68) [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/12/75837> (дата обращения: 25.03.2020).
- Куликова Е. Ф., Куликова Т. П., Соколова В. А.* Фауна озер о. Валаам. Природные комплексы Валаама и воздействие на них рекреации. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1983. С. 156–174.
- Матинян Н. Н., Урусевская И. С.* Почвы острова Валаам. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1999. С. 1–31.
- Шешукова А. А., Шибина Т. Д., Матинян Н. Н.* Минеральный состав магматических почвообразующих пород острова Валаам // Вестн. СПбГУ. 2006. Сер. 3. Вып. 1. С. 125–130.

RESEARCH INTO THE LIMNOLOGICAL PARAMETERS OF LAKE SISJARVI (VALAAM ARCHIPELAGO, LAKE LADOGA)

N. Panova¹, E. Voyakina^{1,2}

¹ *Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg*

² *Saint-Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS, St. Petersburg*

Surveys were carried out in the Valaam Archipelago, situated in the ultraprofundal zone of Lake Ladoga. The purpose was to analyze the limnological characteristics of Lake Sisjarvi – the largest water body in the Valaam Archipelago. Studies of the main limnological parameters were conducted from May – June to September 2013–2019. Samples were collected at three deep, hydrologically different sites in the lake. In summer, distinct temperature stratification is formed at these sites. It is shown that the most variable parameters were turbidity and nutrient content.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КАРЕЛИИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ

К. Д. Одинокова, Е. А. Примак

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Вопрос об устойчивости природных и антропогенных экосистем является одним из важнейших в исследовании природных систем. В первую очередь потому, что одним из главных свойств экосистемы является устойчивое возобновление самой себя в условиях постоянно меняющейся внешней, а также и внутренней среды. Разработаны интегральные индексы для оценки устойчивости водоемов к изменению параметров естественного и антропогенного режимов. Также в работе проведено построение интегрального индекса для оценки устойчивости водоемов к изменению качества вод с учетом нелинейности связи источника и результата воздействия.

В настоящее время сложно выделить водоемы и водотоки, которые не испытывали бы внешнего антропогенного воздействия. Деятельность человека оказывает заметное влияние на ландшафты, что приводит, в том числе, к изменениям качества водной среды.

Оценка устойчивости экосистемы к изменению параметров режимов крайне важна для предотвращения и снижения негативных последствий воздействия антропогенных факторов на водные объекты.

В литературе определение термина «устойчивость» имеет множество значений, поэтому в каждом исследовании автором должна даваться четкая формулировка того, что он понимает под устойчивостью.

В данной работе под устойчивостью водного объекта к изменению параметров режимов понимается его способность сохранять свои свойства и параметры режимов в условиях действующих на него внешних и внутренних нагрузок [Примак, 2009].

Целью исследования является интегральная оценка устойчивости антропогенно-трансформированных водных объектов к изменению параметров режимов с учетом нелинейности связи «доза – эффект».

Материалы и методы исследования

В основе методов оценки устойчивости экологических систем лежит представление об объекте окружающей среды как о сложной многопараметрической системе, то есть его качества и свойства характеризуются набором исходных параметров.

Одним из методов оценки устойчивости водных объектов является интегральная многокритериальная оценка.

Многокритериальная оценка – оценка состояния и воздействия на природные экосистемы с помощью построения сводных показателей по совокупности репрезентативных критериев оценивания. Построение интегрального показателя основывается на методе сводных показателей (МСП) или методе рандомизированных сводных показателей (МРСП) с использованием неполной, неточной и нечисловой информации. При этом реализация этапов проводится либо для нескольких уровней свертки информации, либо все параметры оценки сводились в единую исходную модель-классификацию [Дмитриев, 2010; Дмитриев, Огурцов, 2017]. Разработку интегрального показателя можно разделить на несколько этапов:

На первом этапе проводится отбор обоснованной системы критериев состояния биоты и абиотической среды. Вместе с критериями оценивания вводятся классы состояния (качества, загрязненности, устойчивости и т. п.).

На втором этапе избавляются от размерности исходных характеристик так, чтобы наилучшим условиям по каждому критерию соответствовало значение, равное 0, а наихудшим – равное 1 (или наоборот). Тем самым исходные критерии в различных шкалах измерения приводятся к безразмерным шкалам.

Для критериев первого типа неубывающая кусочно-степенная функция будет иметь следующий вид:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i}\right)^\lambda & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 0, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (1)$$

где q_i – преобразованное значение критерия; x_i – текущее значение критерия; \min_i – минимальное (фоновое, допустимое, безопасное, предельно допустимое и т. п.) значение критерия; \max_i – максимальное значение критерия.

Для критериев второго типа неубывающая кусочно-степенная функция будет иметь следующий вид:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i}\right)^\lambda & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 1, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (2)$$

На третьем этапе выбирается вид интегрального показателя $I(q_i, w_i)$, который строится таким образом, что зависит не только от показателей q_i , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами w_i .

На четвертом этапе вводятся оценки весовых коэффициентов w_i .

Далее на пятом этапе для левой и правой границ каждого класса рассчитывается значение I .

На шестом этапе проводится апробация разработанного интегрального индекса.

Существующие подходы и методы оценки свойств, необходимых для оценки устойчивости системы, как правило, не учитывают нелинейности связей источника и результата воздействия («доза – эффект»). Показатель степени λ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции $q_i(x_i)$: при $\lambda > 1$ соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda < 1$ – вверх. В работе проведено построение интегрального индекса устойчивости водоемов к изменению параметров качества воды с учетом нелинейности связи источника и результата воздействия. Для этого были выбраны два сценария: «Э-1» рассчитан при $\lambda = 1$, «Э-2» выполнен при $0 < \lambda < 1$ [Примаков, 2009].

Для оценки устойчивости водоемов к изменению параметров качества воды были отобраны следующие показатели: взвешенные вещества, мг/дм³; аммонийный азот N-NH₄, мгN/дм³; бихроматная окисляемость, мгO/дм³; биохимическое потребление кислорода, мгO₂/дм³.

Объектом исследования являются данные многолетних наблюдений на антропогенно-трансформированных озерах южной части северного озерного края Карелии: оз. Выгозеро, оз. Сегозеро и оз. Ондозеро.

Оз. Выгозеро (Выгозерское водохранилище) – водоем в Европейской части России, Республика Карелия. Относится к бассейну Белого моря.

Оз. Выгозеро в естественном состоянии существовало до 1931 г. В результате хозяйственного освоения водоем подвергся двум существенным антропогенным изменениям. Первое крупное преобразование было вызвано строительством в 1932 г. Беломорско-Балтийского канала (ББК) и возведением Сегежского целлюлозно-бумажного комбината (СЦБК) на северном берегу оз. Выгозеро в г. Сегеже в 1939 г. Второе преобразование было связано с активным использованием энергетического потенциала водных ресурсов р. Нижний Выг в 1954 г. [Гречушникова, 2019]. После зарегулирования кислородный режим озера оставался удовлетворительным только в летнее время и значительно ухудшался в придонных слоях ряда глубоких участков к концу зимнего периода. Однако, наряду с затоплением, негативное влияние на качество озерной воды оказывало также поступление в воду отходов целлюлозного производства с Сегежского ЦБК [Поздняков, 2001].

Оз. Сегозеро является самым крупным среди озер южной части Северного озерного края. В естественных условиях его площадь (с островами) составляла 753 км² [Поздняков, 2001], после того как в 1957 г. в истоке вытекающей из него р. Сегежи была построена плотина, уровень воды в озере поднялся на 6,3 м, а площадь зеркала созданного озера-водохранилища составила 807 км² [Поздняков, 2001].

Основные антропогенные изменения на озере наблюдались после его зарегулирования, сопровождавшегося значительным поднятием уровня. Изменения отразились на составе макрофитов и биоты, однако вода озера сохранила хорошее качество. Озеро по-прежнему продолжает оставаться олиготрофным [Поздняков, 2001].

Оз. Ондозеро – запрудно-речное озеро ледникового генезиса, появившееся в результате преграждения речных долин ледниковыми наносами. Представляет собой водоем с широким плесом, вытянутым с северо-запада на юго-восток, кроме больших заливов имеются многочисленные небольшие губы. Уровень воды в озере регулируется через сток р. Онды, в устье которой имеется плотина [Поздняков, 2001]. Озеро используется в целях гидроэнергетики (регулирование Выгского каскада, состоящего из пяти гидроэлектростанций), для нужд местного населения, промышленного и любительского рыболовства [Гречушникова, 2019]. Озеро испытывает слабое антропогенное загрязнение, по большинству характеристик вода близка к природному состоянию.

Результаты и их обсуждение

Оз. Выгозеро. По результатам оценки устойчивости к изменению параметров режимов выявлено, что во все рассматриваемые периоды устойчивость оз. Выгозеро к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды и к эвтрофированию соответствует III классу устойчивости, устойчивость «средняя».

Оз. Сегозеро. По результатам оценки устойчивости к изменению параметров режимов выявлено, что устойчивость оз. Сегозеро к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды и к эвтрофированию соответствует II классу устойчивости, устойчивость «выше средней».

Оз. Ондозеро. По результатам оценки устойчивости к изменению параметров режимов выявлено, что устойчивость оз. Ондозеро к изменению параметров естественного режима и изменению качества воды и к эвтрофированию соответствует II классу устойчивости, устойчивость «выше средней».

Оз. Выгозеро. Результаты показали, что устойчивость оз. Выгозеро к изменению качества воды соответствует IV классу устойчивости, устойчивость «ниже средней».

Оз. Сегозеро. Результаты показали, что устойчивость оз. Сегозеро к изменению качества воды соответствует IV классу устойчивости, устойчивость «ниже средней».

Оз. Ондозеро. Результаты показали, что устойчивость оз. Ондозеро к изменению качества воды соответствует IV классу устойчивости, устойчивость «ниже средней».

Результаты построения интегрального показателя с учетом нелинейности связи источника и результата воздействия представлены в табл.

Значения сводного показателя и классы устойчивости к изменению параметров качества воды

Водоем	Э-1		Э-2	
	I	Класс	I	Класс
Оз. Выгозеро	0,125	IV	0,314	IV
Оз. Сегозеро	0,079	IV	0,226	IV
Оз. Ондозеро	0,115	IV	0,299	IV

Анализ полученных значений показал, что результаты расчетов по сценарию «Э-1» при $\lambda = 1$ и по «Э-2» при $0 < \lambda < 1$ существенно не различаются. Все рассматриваемые водоемы относятся к IV классу устойчивости к изменению параметров качества воды.

Выводы

Озера Выгозеро, Сегозеро и Ондозеро являются антропогенно-трансформированными водоемами. Все исследуемые водоемы испытывают антропогенное влияние, в большей степени ему подвержено оз. Выгозеро, в связи с его включением в трассу ББК и работой СЦБК.

В работе были разработаны интегральные индексы для оценки устойчивости водоемов к изменению параметров естественного и антропогенного режимов. Построение интегральных показателей было проведено на основе метода сводных показателей.

Результаты показали, что оз. Выгозеро соответствует III классу устойчивости, то есть обладает средней устойчивостью к изменению параметров и режимов. Оз. Сегозеро и оз. Ондозеро соответствуют II классу устойчивости, то есть обладают устойчивостью «выше средней» к изменению параметров и режимов.

Также выполнено построение интегрального индекса для оценки устойчивости водоемов к изменению качества вод с учетом нелинейности связи источника и результата воздействия. Выяснено, что построение сводного показателя с учетом нелинейности связи не приводит к значительным изменениям результатов, но позволяет привести оценочные шкалы к такому виду, чтобы на каждый класс приходилось примерно равное процентное соотношение характеристики.

Результаты показали, что озера Выгозеро, Сегозеро и Ондозеро соответствуют IV классу устойчивости, то есть обладают устойчивостью «ниже средней» к изменению параметров качества воды.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 19-05-00683.

Список литературы

- Гречушникова М. Г. Научно-популярная энциклопедия «Вода России» – Выгозеро озеро [Электронный ресурс]. 2019. Электронные текстовые данные. Москва. Режим доступа: http://water-rf.ru/Водные_объекты/Выгозеро, свободный.
- Дмитриев В. В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера. 2010. Т. 2, № 3. С. 507–520.

Дмитриев В. В., Огурцов А. Н. Устойчивость сложных систем в природе и обществе: методология, оценка, результаты // Учен. зап. РГГМУ. 2017. № 48. С. 72–84.

Дмитриев В. В., Пряхина Г. В., Огурцов А. Н., Примак Е. А., Амаро Медина Д. Оценка эмерджентных свойств водных объектов: трофический статус, устойчивость, экологическое благополучие // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: сб. докл. Междунар. науч. конф. памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербург. 28–30 марта 2018 г. Научные технологии. С. 347–354.

Озера Карелии [Электронный ресурс]: справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013(2015). 463 с.

Поздняков Ш. Р. Озера России. Озера, образовавшиеся в пределах Карельского сегмента Балтийского кристаллического щита. 2001. Режим доступа: <http://win.limno.org.ru/db/lrus.htm>, свободный.

Примак Е. А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук. СПб., 2009. 24 с.

Филатов Н. Н., Лозовик П. А., Литвиненко А. В. Современное состояние водных объектов Республики Карелия: Препринт доклада на Президиуме КарНЦ РАН. Петрозаводск, 1998. 30 с.

ASSESSMENT OF THE RESISTANCE OF TRANSFORMED WATER BODIES IN KARELIA WITH ALLOWANCES FOR NON-LINEARITY

K. Odínokova, E. Primak

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

The question of the resistance of natural and anthropogenic ecosystems is of major importance in the study of natural systems. First and foremost, this is because one of the main properties of an ecosystem is stable self-reproduction in a constantly changing external as well as internal environment. Integral indexes were developed to assess the resistance of water bodies to changes in the parameters of natural and anthropogenic regimes. In addition, we have designed an integral index to assess the resistance of water bodies to changes in water quality taking into account the non-linear relationship between the source and the result of the impact.

ОГРАНИЧЕНИЯ РЕКРЕАЦИОННОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. А. Чекмарева

Институт водных проблем РАН, Ивановская НИС, Конаково

Рекреационное водопользование в РФ имеет важное значение как перспективный вид отдыха и восстановления сил, занятий водными видами спорта человеком с использованием водных ресурсов. Были разработаны уровни доступа к озерам с целью оценки возможности использования акватории и береговой зоны водоемов для рекреации. Озера северо-запада Тверской области испытывают незначительную антропогенную нагрузку, качество воды в них соответствует ПДК, установленным в РФ. Ограничениями к рекреационному водопользованию озер являются слабая изученность экологического состояния, ограничение в доступе к акватории и береговой линии озер (отсутствие автодорог, залесенность и заболоченность берегов).

Оценка доступа населения к водоемам с хорошим качеством воды является важной частью мировой политики в отношении водных ресурсов. Европейское агентство по окружающей среде контролирует качество воды водоемов стран Европы для рекреационного водопользования, в том числе для купания [European Environment Agency, Council Directive 2006/7/EC..., 2006]. В России контроль за качеством воды сложно проводить на водоемах, удаленных от крупных городов, к таким водоемам относятся озера северо-запада Тверской области.

Процесс рекреационного водопользования заключается в использовании водоема для отдыха и восстановления сил человека, занятий водными видами спорта. Он включает в себя

использование акватории (купание, эксплуатация маломерного флота и устройств, предназначенных для перемещения по воде и под водой, рыбалка) и береговой зоны (пляжный отдых, туризм, занятия спортом, организация пикников, прогулки).

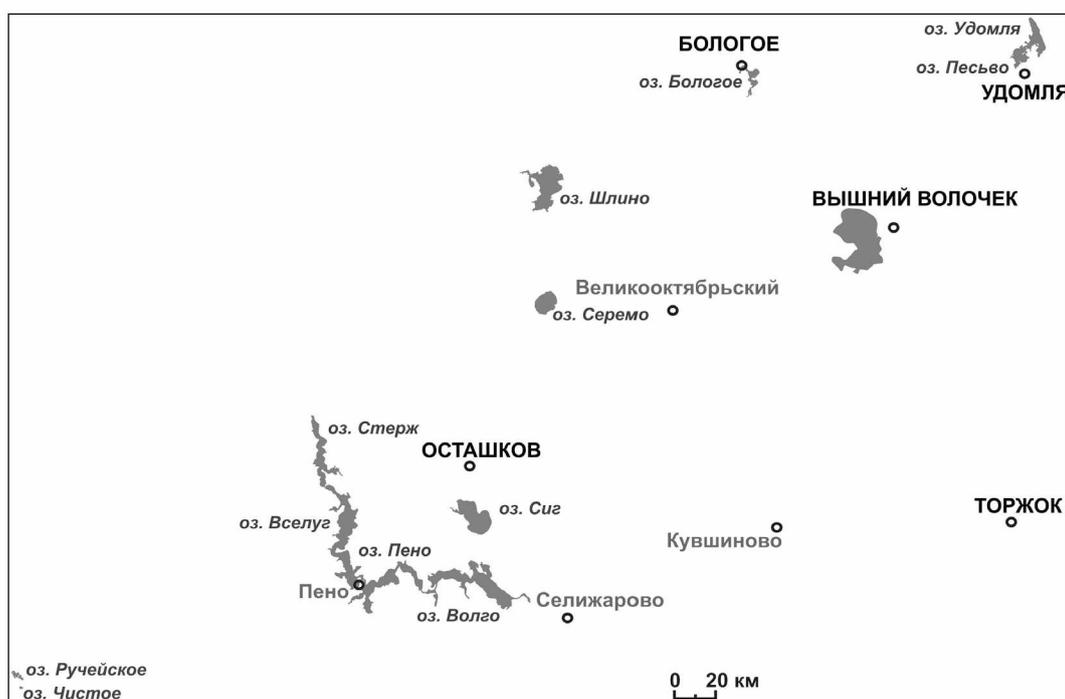
Ограничение рекреационного водопользования заключается в несоответствии водоема, его береговой зоны и района, в котором находится водоем, заявленным требованиям. Водоем и его береговую зону оценивают по ряду характеристик (рекреационный потенциал и социально-экономическая структура района местонахождения озера, экологическое состояние водоема), выявляя уровень доступа для рекреационного водопользования (табл. 1).

Таблица 1. Уровни рекреационного доступа к водному объекту

Уровень	Соответствуют всем показателям	Показатели можно улучшить	Ограничения к безопасной эксплуатации
Рекреационно-доступный	да	да	нет
Рекреационно-доступный с ограничениями	нет (незначительно)	да (несложно)	есть (неопасные)
Рекреационно-доступный с сильными ограничениями	нет (значительно)	да (сложно)	есть
Рекреационно-недоступный	нет	нет	есть (опасно)

В рамках исследования проведена оценка экологического состояния озер северо-запада Тверской области.

Гидрохимические исследования качества воды в озерах проведены сотрудниками Ивановской НИС Института водных проблем РАН с 2008 г., результаты последних исследований опубликованы [Григорьева и др., 2019]. Пробы воды отбирали из озер согласно ГОСТ 3161-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб» [ГОСТ 3161-2012, 2013]. Анализ проб воды по стандартным методикам проводили в аттестованной химической лаборатории ИВНИС ИВП РАН (г. Конаково, Тверская область; аттестат аккредитации RA.RU.21АН96 от 28.10.2016). Химический анализ воды включал определение: физико-химических показателей, макрокомпонентного состава, биогенных элементов, показателей содержания органических соединений, содержания кислорода, нефтепродуктов, СПАВ, тяжелых металлов. Объекты исследования – озера, расположены в Тверской области (рис.): Бологое (г. Бологое), Волго (с. Селище, п. Пено), Шлино (д. Красилово, д. Яблонька, д. Комкино), Пено (д. Нечаевщина), Сиг (д. Краклово), Вселуг (с. Широкое), Песьво и Удомля (Удомльский р-н).



Карта расположения озер северо-запада Тверской области

В воде озер северо-запада Тверской области наблюдается снижение концентраций загрязняющих веществ ($\text{SO}_4^{2-} < 4,8 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Cl}^- < 4,6 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Fe}_{\text{общ.}} < 0,3 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Mn} < 0,1 \text{ мг/дм}^3$, $\text{NO}_3^- < 1,06 \text{ мг/дм}^3$, $\text{PO}_4^{3-} < 0,054 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Pb} < 0,01 \text{ мг/дм}^3$) из-за отсутствия источников загрязнения, кроме озер Бологое, Удомля и Песьво, где техногенная нагрузка на водоемы выше. С заболоченного водосбора идет подпитка озер высокоцветными водами с высокими концентрациями железа и марганца. Вода в озерах не превышает предельно допустимых концентраций (ПДК) в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (водоемы второй категории), установленных в РФ [ГН 2.1.5.1315-03, 2003].

Гидрохимические характеристики исследованных озер Тверской области представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Диапазоны значений (min–max) некоторых гидрохимических характеристик исследованных озер Тверской области, лето 2009–2018 гг.

Показатель	Бологое/2009 г.	Сиг/2009 г.	Серемо/2012 г.	Шлино/2017 г.	Узван/2017 г.	Вселуг/2018 г.	Пено/2018 г.
pH, ед. pH	7,6–8,0	6,4	–	7,1–7,2	7,0	7,8	8,0
M, мг/дм ³	193–202	76	40	79–97	93	125	108
SiO ₂ , мг/дм ³	0,5–0,6	0,3	2,0	0,56–0,72	0,65	0,81	0,66
Fe _{общ.} , мг/дм ³	0,07–0,08	0,08	0,12	0,12–0,16	0,07	0,30	0,21
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0,7–1,1	1,06	0,64	0,33–0,72	0,37	0,23	0,18
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,01–0,02	0,006	0,028	0,018–0,027	0,015	0,017	0,021
Цв., град.	35–42	23	60	56–64	25	80	70
Мут., мг/дм ³	–	–	10,3	2,0–6,2	0,30	3,5	2,1
Pb, мг/дм ³	< 0,01	< 0,01	–	–	–	–	–

Примечание. M. – минерализация, Цв. – цветность, Мут. – мутность.

Таблица 3. Диапазоны значений (min–max) некоторых гидрохимических характеристик исследованных озер Тверской области, лето 2019 г.

Показатель	Волго/2019 г.	Песьво/2019 г.	Ручейское/2019 г.	Стерж/2019 г.	Удомля/2019 г.	Чистое/2019 г.
pH, ед. pH	7,6–7,9	8,5	7,7	7,9	8,4	7,7
M, мг/дм ³	111–119	290	108	125	308	102
SiO ₂ , мг/дм ³	0,29–0,51	0,78	0,63	0,46	0,98	0,56
Fe _{общ.} , мг/дм ³	0,07–0,08	0,03	0,15	0,23	0,03	0,14
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	0,35–0,44	0,8	0,34	0,42	0,51	0,38
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,017–0,019	0,086	0,015	0,054	0,054	0,014
Цв., град.	40–45	30	30	50	35	10
Мут., мг/дм ³	4,2–5,6	1,5	0,39	0,77	1,0	0,71
Pb, мг/дм ³	0,004–0,0046	–	–	0,01	–	–

Примечание. M. – минерализация, Цв. – цветность, Мут. – мутность.

Для северо-запада Тверской области характерны природные лесные и водные типы рекреационных ландшафтов, они представляют собой саморегулируемые лесные и водные экосистемы. Часто это труднодоступные (сложно добраться на автомобильном транспорте) территории с низкой плотностью населения (2,5–14,5 чел./км²), где отсутствует или слабо развита инфраструктура.

Озера Бологое, Шлино, Удомля и Песьво относятся к природно-антропогенным (природные, измененные человеком) водным рекреационным ландшафтам. Это частично саморегулируемые природные водные системы, где функционирование водных систем происходит с участием человека (укрепление берегов, расчистка дна, выкашивание мелководий, высадка высших водных растений, разведение рыб, земноводных и птиц, контроль уровня воды). Доступные (в отношении автомобильного транспорта) для рекреации территории, где слабо- и среднеразвита инфраструктура.

Верхневолжские озера Стерж, Вселуг, Пено и Волго образуют Верхневолжское водохранилище, в котором осуществляется сезонное регулирование стока.

Морфометрические характеристики озер рассчитаны при дешифровке спутниковых снимков высокого разрешения НАСА со спутника Ландстат 8, проведена оценка уровня зарастания, застроенности, залесенности, заболоченности акватории водоемов (табл. 4). Уровень зарастания, установленный по спутниковым снимкам, включает в себя площади прибрежной надводной высшей водной растительности и крупных сплавин плавающей водной растительности. Методика оценки рекреационного потенциала описана в ряде публикаций [Ланцова и др., 2005; Чекмарева, 2019].

Таблица 4. Морфометрические характеристики и оценка рекреационного потенциала исследованных озер Тверской области

Показатель	Бологое	Верхне- волжские озера	Ручейское	Серемо	Сиг	Шлино
S акватории, тыс. м ²	5,7	183	1,5	15,7	31,1	36,0
Длина тах/ширина тах, м	4,7/3,5	92,5/44	2,8/1,2	5,3/4,2	8,9/5,6	9,2/7
Глубина тах/сред., м	4,3/3	16/4,4	27/9	3/0,8	-/6,2	3/1,9
S зарастания акватории, %	9,5	< 5	–	10,5	5,6	7,6
S общедост. берег. зоны, тыс. м ²	392,4	4500	202,52	309,3	652	940,2
S застроенности, %	36,4	–	0	0	18,5	38,8
S залесенности, %	39,1	–	87,9	74,4	73,6	40,3
S заболоченности, %	24,5	–	12,1	25,6	7,9	20,9
Рекреац. потенциал, тыс. чел.	78,48	900	40,5	61,85	130,4	188

Примечание. Верхневолжские озера – по: [Вода России, 2017].

По результатам исследований можно отметить, что озера северо-запада Тверской области являются рекреационно-доступными с ограничениями для рекреационного водопользования. Это связано с тем, что данных анализа воды озер на микробиологическое и паразитологическое загрязнение (наличие диких птиц и сброс неочищенных коммунально-бытовых вод указывает на возможное загрязнение) нет; зоны отдыха на берегу не выделены либо недостаточно благоустроены для купания; подход к берегу затруднен (зарос, залесен, заболочен); озера удалены от автомобильных дорог с качественным покрытием.

Для исследованных озер рекомендовано разработать документацию по установлению статуса водоема либо его участка «Для рекреационного водопользования». Присвоение водоему статуса «Для рекреационного водопользования» предполагает ограничение хозяйственной деятельности на акватории, в береговой зоне водоема либо на его участке, в том числе контроль за источниками загрязнения, экологическим состоянием водоема (организация мониторинговых наблюдений) и уборкой в его береговой зоне (коммунальные службы города). Ограничение хозяйственной деятельности предполагает запрет на размещение вредных производств вблизи водоема и переориентацию на рациональное природопользование уже существующих производств (переход на новые технологии и системы очистки, снижение нагрузки на водоем и его водосборную территорию, запрет на создание полигонов ТКО).

При оценке доступа к водоему и его безопасной эксплуатации необходимо учитывать гидрологические и морфометрические параметры. На исследуемых озерах можно провести зонирование в пунктах рекреационного водопользования: обустройство пляжных, пикниковых, спортивных, детских, развлекательных, информационных зон, зон питания, проката оборудования, стоянки, активного отдыха на акватории, туалета, хранения мусора, при этом предусмотрено сохранение природных зон (нерестилищ, заводей с растительностью, мест гнездования птиц и обитания зверей). Важно учитывать виды водопользования, некоторые рекомендовано исключить из использования на конкретном водном объекте для сохранения природной среды. Так, для рекреационного водопользования на озерах северо-запада Тверской области рекомендовать пеший туризм и отдых с палатками, научно-познавательный туризм, отдых с использованием плавательных средств, купание (в разрешенных местах), рыбалку, дайвинг, подводную охоту, спортивный водный туризм, экстремальный туризм, экскурсии, фототуризм.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-35-00609.

Список литературы

Григорьева И. Л., Комиссаров А. Б. Верхневолжское водохранилище // Научно-популярная энциклопедия «Вода России», 2017 [Электронный ресурс] / URL: <http://water-ru.ru> (дата обращения: 20.03.2020 г.).

Григорьева И. Л., Комиссаров А. Б., Кузовлев В. В., Чекмарева Е. А. Современное состояние качества воды различных типов озер Тверской области // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: сб. тр. II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Ч. 2. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2019. С. 60–65.

ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. М.: Стандартиформ, 2003. 84 с.

ГОСТ 3161-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. 2013. 32 с.

Ланцова И. В., Григорьева И. Л., Тихомиров О. А. Геоэкологические проблемы рекреационного водопользования Иваньковского водохранилища // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 1. С. 115–122.

Чекмарева Е. А. Рекреационная доступность озер ЦФО России // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: сб. тр. II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Ч. 1. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2019. С. 205–209.

European Environment Agency, Council Directive 2006/7/EC concerning the management of bathing water quality and repealing Directive 76/160/EEC // EU, OJ L 64, 4.3. 2006. P. 37–51.

LIMITATION OF RECREATIONAL WATER USE OF LAKES IN NORTH-WESTERN TVER REGION

E. Chekmareva

Ivankovskaya Research Station, Branch of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Konakovo

Recreational water use in the Russian Federation is an important form of rest, recuperation, and water sports. Levels of access to lakes and use of the water area and coastal zone of reservoirs for recreation have been developed. Lakes in the North-West of the Tver Region are not exposed to heavy anthropogenic pressure, and their water quality meets MPC for the Russian Federation. Recreational water use on lakes is constrained by a lack of knowledge of the environmental status, poor access to the water area and shoreline of lakes (lack of roads, wooded and boggy shores).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БЕЛОМ МОРЕ С УЧЕТОМ ЭКОСИСТЕМЫ МОРСКОГО ЛЬДА

И. А. Чернов¹, А. В. Толстикова², Н. Г. Яковлев³

¹ *Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

² *Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

³ *Институт вычислительной математики РАН, Москва*

Представлена численная модель Белого моря JASMINE, воспроизводящая динамику вод и льда, биогеохимические процессы в пелагической экосистеме и экосистеме морского льда. Обсуждаются результаты моделирования моря с пространственным разрешением 3 км, а также моделирование экосистемы льда.

Быстрое развитие вычислительной техники за последнее десятилетие – рост производительности и числа процессоров и процессорных ядер, емкости устройств хранения данных, скорости передачи данных, рост доступности и снижение стоимости – открыло новые возможности численного моделирования сложных систем, в том числе в науках о Земле. Тем не менее детальное комплексное описание системы моря все еще представляет серьезную трудность и требует значительной мощности и большого количества процессорного времени. Необходимо описывать трехмерные течения, динамику температуры и солености морской воды, меняющийся уровень

морья, лед, состоящий из льдин различной толщины и площади, неравномерно покрытых снегом. При включении пелагической экосистемы приходится описывать различные группы планктона (автотрофы, гетеротрофы, нефотосинтезирующие бактерии), несколько видов органического вещества, растворенное в воде неорганическое вещество: нитраты, фосфаты, силикаты, кислород, углекислый газ, сероводород, а также потоки вещества между этими группами и обмен с внешней средой.

Число групп (и, следовательно, переменных в модели) может сокращаться за счет укрупнения групп, что дает выигрыш в производительности.

Чисто пелагическая модель, в которой органические останки реминерализуются бактериями водной толщи, не может быть адекватной в мелководном море, поскольку значительная часть останков достигает дна. Приходится принимать во внимание обмен вещества с донными отложениями и описывать бентосную экосистему или, по меньшей мере, реминерализацию органического вещества на дне.

Морской лед является важным фактором, ограничивающим развитие планктона, поскольку эффективно ослабляет поток солнечной радиации в воду, особенно при наличии снега. Сложная структура морского льда с переменным альбедо, полыньями, распределением льдин и снежного слоя на льду по толщине существенно усложняет задачу. При этом правильное описание морского льда становится критически важным для динамики экосистем. В морях, в которых летом льда мало или нет совсем, очень важную роль играет короткий промежуток времени весной, когда световой день уже достаточно велик, а лед активно тает. Впрочем, этот интервал может быть также важен для Северного Ледовитого океана, поскольку площадь и толщина льда снижаются, а длина светового дня растет.

Наконец, известно, что морской лед обладает собственной экосистемой. Соленый лед содержит поры и каналы, наполненные водой с повышенной концентрацией соли. Если относительный объем этих полостей достаточно велик, так что они соединены между собой и с толщей воды подо льдом, они населены живыми организмами, среди которых можно выделить фитопланктон, зоопланктон и бактерии. Там присутствуют биогенное вещество, органические останки и т. п. Талые лужи на льду и его нижняя поверхность также могут быть населены. Поэтому правильное описание льда и особенно его оптических свойств становится еще более важным. При таянии льда вещество, органические останки и живые организмы из полостей попадают в верхний слой воды, воздействуя на пелагическую экосистему.

В работе обсуждаются вопросы численного моделирования системы Белого моря с учетом гидродинамики и термодинамики вод и льда, пелагической экосистемы, обмена веществом с морским дном и экосистема биологически активного слоя морского льда. Совместная модель JASMINE основана на модели FEMAO, целенаправленно разработанной для Северного Ледовитого океана и хорошо описывающей систему морского льда. Модель пелагической экосистемы BFM (bfm-community.eu), работающая совместно с такими моделями динамики океана, как NEMO, POM и MITgcm, используется в проектах MyOcean, GREENSEAS, GEOCARBON, MEECE и других и применялась для Средиземного моря и его периферии, Мирового океана в целом, северной части Тихого океана и Балтийского моря. Она описывает различные группы организмов (крупный фитопланктон, диатомовые и сине-зеленые водоросли, автотрофные и гетеротрофные жгутиконосцы, хищный и всеядный зоопланктон, микрозоопланктон и нефотосинтезирующие бактерии) и взвешенное и растворенное в воде вещество набором скалярных полей. Описываются потоки вещества между группами – они соответствуют разнообразным биологическим взаимодействиям, таким, как питание, фотосинтез, разложение, размножение, дыхание и т. п.

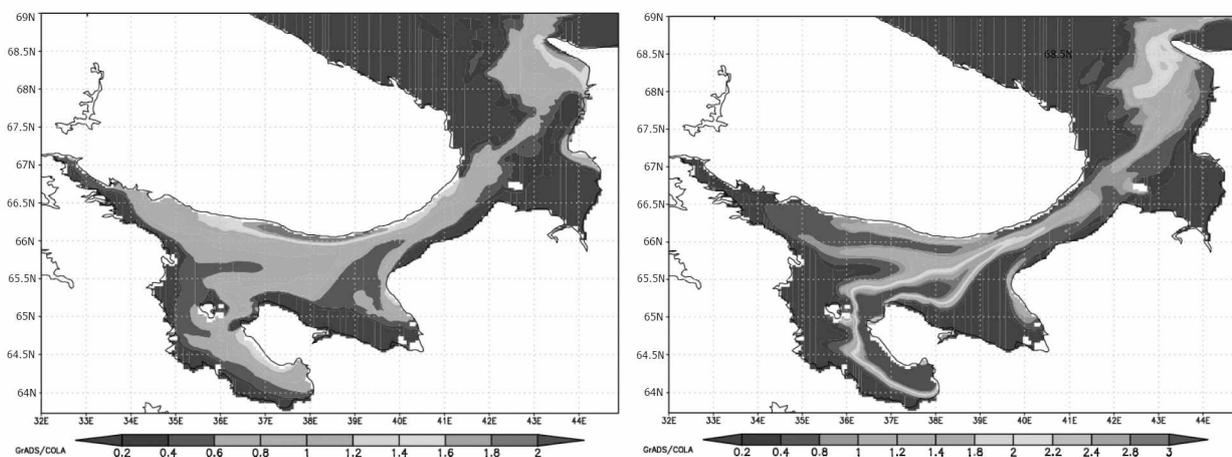
Модель BFM, кроме этого, содержит блок бентоса (который мы не использовали) и блок экосистемы льда. Обмен с донными отложениями описан в модели параметрически: падающее вещество реминерализуется со скоростью, зависящей от температуры воды в придонном горизонте и пропорциональной количеству упавшего на дно органического вещества, и возвращается в толщу воды в виде потока неорганического вещества на дне. Падающее вещество разделяется на две фракции: медленную и быструю, с различными скоростями разложения.

Система морского льда описывается несколькими группами двумерных скалярных полей с потоками вещества между ними и включает в себя фито- и зоопланктон, бактерии, детрит, растворенное неорганическое вещество (в том числе углекислый газ и кислород) и органиче-

ское вещество. Двумерность полей означает, что биологически активный слой (нижний слой льда, пористость которого достаточно велика, чтобы полости были соединены и имели сообщение с подледной водой) считается однородным по вертикали. Толщина этого слоя определяется по профилю температуры и солености льда (последняя в модели принята за константу 4 ‰), а также по эмпирическому порогу пористости 5 % и с учетом зависимости температуры замерзания от солености в линейном приближении.

Характеристики морской воды (температура, соленость, плотность, освещенность и т. п.) и морского льда (соленость, освещенность подо льдом, толщина и еще ряд параметров) представляются моделью динамики моря, она же осуществляет расчет адвекции скаляров. Обратное воздействие экосистемы на гидро- и термодинамику возможно из-за изменения оптических свойств воды и льда. Вычисление освещенности в биологически активном слое особенно важно, поскольку лед описан как ансамбль льдин различной толщины, покрытых снегом, а экосистема льда относится к некоторому среднему по этому ансамблю.

Представлены первые результаты расчетов совместной модели динамики вод, льда, экосистемы пелагиали и льда с учетом обмена веществом с бентосом на примере Белого моря. На рис. показаны среднесуточная толщина льда и концентрация (мг/м^2) хлорофилла «a» в активном слое морского льда 15 марта условного года.



Среднесуточные толщина льда (м, слева) и концентрация (мг/м^2 , справа) хлорофилла «a» в активном слое морского льда 15 марта условного года

Работа по разработке и развитию численной модели моря высокого разрешения выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-05-60184-Арктика.

NUMERICAL SIMULATION OF BIOGEOCHEMICAL PROCESSES IN THE WHITE SEA, INCLUDING THE SEA-ICE ECOSYSTEM

I. Chernov¹, A. Tolstikov², N. Iakovlev³

¹ *Institute of Applied Mathematical Research, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk*

² *Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk*

³ *Institute of Numerical Mathematics of RAS, Moscow*

We present the numerical model of the White Sea JASMINE. It simulates the dynamics of sea water, sea ice, as well as biogeochemical processes in the pelagic and sympagic ecosystems. The results of modeling with a spatial resolution of 3 km will be discussed, and the influence of taking sympagic ecology into account will be demonstrated.

НОВАЯ СОВМЕСТНАЯ МОДЕЛЬ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА И МОРСКОГО ЛЬДА

Н. Г. Яковлев¹, И. А. Чернов²

¹ Институт вычислительной математики РАН, Москва

² Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

Представлена новая специализированная региональная климатическая численная модель Северного Ледовитого океана, призванная воспроизводить динамику вод и льда с большей точностью по сравнению с моделями Земной системы.

Анализ данных наблюдений и расчетов с численными климатическими моделями показывает, что с 80-х гг. XX столетия в Арктическом регионе происходит хорошо заметное потепление климата. Следует особо подчеркнуть, что скорость роста приземной температуры в Арктике более чем вдвое превышает ее изменения в среднем по поверхности Земли, что ведет к структурным изменениям регионального климата, выражающимся в беспрецедентном уменьшении площади морского льда, деградации вечной мерзлоты, изменении биосферы региона и т. д. Следует отметить, что именно в Арктике современные климатические модели имеют значительные систематические ошибки. Главной причиной этого является чрезвычайная сложность самой системы – ее многокомпонентность (лед, особенности пограничного слоя и т. п.), необходимость учета процессов, начиная с микромасштабов (полюньи и т. п.).

В работе представлена специализированная региональная климатическая модель Арктического региона (блок моделирования состояния океана) – модель совместной динамики океана и морского льда FEMAO (Finite-Element Model of the Arctic Ocean). Она изначально разрабатывалась как специализированная модель для воспроизведения состояния Северного Ледовитого океана. Особенности модели:

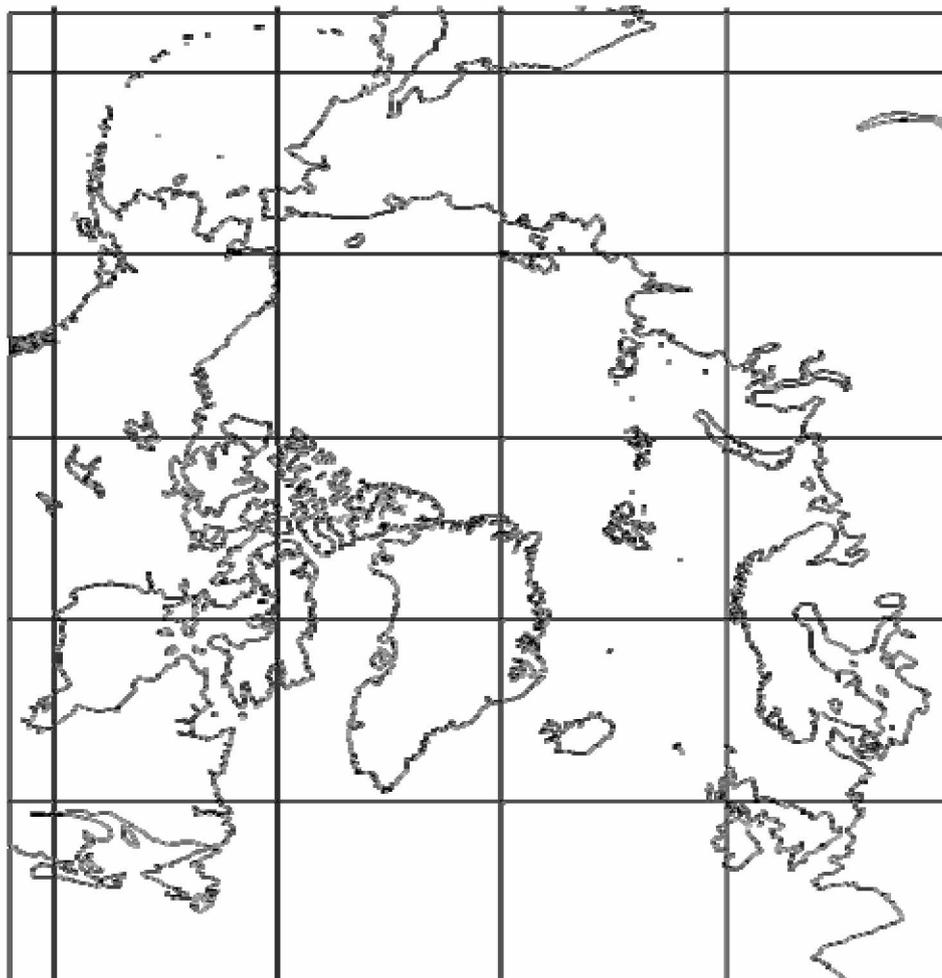
- Пространственная аппроксимация – комбинация МКЭ и МКО, облегчающая построение энергетически сбалансированных аппроксимаций для сложных операторов, в том числе операторы граничных условий.
- Расщепление по физическим процессам.
- Нет расщепления на баротропную и бароклинную компоненты скорости течений.
- Схемы по времени – двухшаговый метод Тейлора – Галеркина (третьего порядка точности) с коррекцией потоков (схема Лернера в качестве монотонной схемы низкого порядка точности) для переноса скаляров (трехмерных и двумерных) в поле среднего и квази-Стоксова течения. Схема Эйлера для изопикнической турбулентной диффузии. Неявная схема для вертикальной диффузии и вертикальной компоненты изопикнической турбулентной диффузии. Организация общей схемы по времени обеспечивает согласованность генерации кинетической энергии турбулентных пульсаций и диссипации средней кинетической энергии.
- Двухшаговая схема предиктор-корректор (схема Свонси) для переноса импульса, метод коллокации для аппроксимации массовой матрицы в уравнениях баланса импульса.

К настоящему времени добавлен блок вертикальной турбулентности, основанной на модели Меллора – Ямады уровня 2,5, согласованный с блоком динамики океана. Динамика льда рассчитывается в предположении обычной эллиптической вязко-пластичной реологии. Используется итерационный метод нахождения скоростей дрейфа EVP. Двухшаговый метод Тейлора – Галеркина с коррекцией потоков используется для расчета адвекции описывающих лед двумерных полей.

Система координат сферическая (многообразие «цилиндр над сферой»), повернута относительно географической системы координат так, что Северный полюс перемещен на экватор.

Разрешение модели составляет 14 км (0,125°), вертикальная z-сетка насчитывает 52 горизонта со сгущением у поверхности. Размерность сетки 505 на 641 точку. Шаг по времени – 7,5 мин. Среднемесячные значения термохалинных полей на жидких границах области, суточный атмосферный форсинг – температуру и давление воздуха, осадки, ветер и облачность, относительную влажность воздуха, а также суточную солнечную радиацию и начальные распределения температуры и солености воды – составляет модель Земной системы INMCM5.

Учтен сток восьми основных рек (Енисей, Колыма, Лена, Маккензи, Мезень, Обь, Онега, Северная Двина), для которых заданы годовой сток и общее для всех рек распределение стока по месяцам. Поток пресной воды из реки добавляется к осадкам в ячейке, соответствующей устью реки. Альтернативно сток рек может определяться моделью Земной системы. Кроме того, реки могут описываться как особые пресноводные проливы.



Модельная область

На рис. показана модельная область. Помимо Северного Ледовитого океана, она включает в себя часть Атлантического и Тихого океанов.

Скорость расчетов составляет 9,5 месяца за сутки на 60 процессорных ядрах на кластере ИВМ РАН.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-05-60184-Арктика.

A NEW INTEGRATED MODEL OF THE ARCTIC OCEAN AND SEA ICE

N. Iakovlev¹, I. Chernov²

¹ *Institute of Numerical Mathematics of RAS, Moscow*

² *Institute of Applied Mathematical Research, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk*

We present a new regional climatic numerical model of the Arctic Ocean, which aims at simulating the dynamics of water and sea ice with higher accuracy compared to Earth system models.

ГИДРОХИМИЯ

ФОРМИРОВАНИЕ И КАЧЕСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕКИ БОЛЬШОЙ КИНЕЛЬ

К. В. Беспалова

*Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал ФГБУН Самарского
федерального исследовательского центра РАН, Тольятти*

Приведены результаты экспедиционных исследований водных ресурсов реки Большой Кинель, которая является источником питьевого водоснабжения городского населения Самарской области. Анализ межгодовой и сезонной изменчивости расходов воды реки в районе водозабора г. Отрадный показывает, что данная река является ненадежным источником питьевого водоснабжения. Межгодовые колебания расходов воды в меженьный период весьма значительны и изменяются в 6–7 раз. Самый неблагоприятный для водоснабжения период – это июль месяц, когда средние месячные расходы воды уменьшались до 6,8 м³/с. Качество воды в реке в течение всего года не соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к источникам хозяйственно-питьевого водопользования по минерализации, жесткости и биохимической окисляемости. Периодически качество воды не соответствует по мутности, биохимическому потреблению кислорода и нефтепродуктам. В воде содержится повышенное содержание сульфатов и биогенных веществ, особенно нитратов.

Данные мониторинга убедительно доказывают, что качество воды большинства рек Европейской части России не соответствует нормативным требованиям. При этом именно эти водотоки являются основными источниками хозяйственно-питьевого водоснабжения населения. Поэтому обеспечение населения качественной питьевой водой из рек с каждым годом становится все более проблематичным. Особенно остро эта проблема стоит в бассейне Волги, где реки испытывают чрезмерную антропогенную нагрузку [Селезнева, 2007; Селезнев и др., 2014].

Среди водных объектов Самарской области р. Б. Кинель занимает особое место, так как является источником питьевого водоснабжения г. Отрадный и г. Кинель, численность населения которых на 2019 г. составляет 48,7 и 34,5 тыс. человек, соответственно. Для населения этих городов другого альтернативного источника питьевого водоснабжения нет. Поэтому оценка и прогноз качества водных ресурсов реки имеет важное водохозяйственное значение.

Река Б. Кинель впадает в р. Самару и является одним из крупнейших притоков второго порядка Саратовского водохранилища. Площадь бассейна р. Б. Кинель составляет 14,9 тыс. км², средняя высота водосбора реки – 154 м, средний уклон реки – 0,6 ‰. Русло реки извилистое, в среднем течении реки встречается множество мелких старичных озер, а в нижнем течении – заболоченные участки поймы.

Долина реки хорошо выражена, шириной в верховье 1,5–2 км, в нижнем течении – 7–8 км. Длина реки составляет 422 км. Свое начало река берет на западном склоне Общего Сырта и протекает по территории Оренбургской (196 км) и Самарской (226 км) областей. Основные боковые притоки р. Б. Кинель, имеющие площадь водосбора более 100 км², в ранжированном виде представлены в табл. 1. Суммарная водосборная территория 13 боковых притоков равна 10 359 км², что составляет 69,52 % от площади всего бассейна р. Б. Кинель. Количество малых притоков, длиной менее 10 км – 77, а их общая протяженность – 279 км. Общее количество озер и водохранилищ в бассейне реки составляет 663 с общей площадью зеркала – 18,6 км².

Таблица 1. Характеристика основных притоков 1-го порядка р. Б. Кинель

№	Притоки	Берег впадения притока	Длина, км	Площадь, км ²	Доля в бассейне, %
1	Малый Кинель	левый	201	2690	18,05
2	Мочегай	правый	90	2170	14,56
3	Кутулук	левый	144	1340	8,99
4	Сарбай	правый	81	968	6,50
5	Савруша	правый	50	916	6,15
6	Умирка	левый	57	458	3,07
7	Ереуз	правый	40	453	3,04
8	Аманак	правый	35	408	2,74
9	Саврушка	правый	35	281	1,89
10	Большая Кисла	правый	27	257	1,72
11	Черновка	левый	15	167	1,12
12	Камышла	правый	20	150	1,01
13	Турхановка	правый	24	101	0,68

По водному режиму р. Б. Кинель относится к средневожскому типу, который характеризуется высоким весенним половодьем, редкими и невысокими летне-осенними паводками и продолжительной летне-осенней и зимней меженью. Водный сток реки формируется в основном за счет зимних осадков, осадки теплого периода на питание реки существенного влияния не оказывают. Средний годовой модуль водного стока р. Б. Кинель уменьшается к устью.

В верхней части р. Б. Кинель (с. Азаматово) средний годовой расход воды (Q) составляет 3,19 м³/с, максимальный (Q_{max}) – 6,27 м³/с, минимальный (Q_{min}) – 0,87 м³/с. В нижней части реки (п. Тимашево) Q составляет 41,0 м³/с, Q_{max} – 72,60 м³/с, Q_{min} – 16,10 м³/с (табл. 2).

Внутри года средние месячные расходы воды меняются весьма существенно. В районе с. Азаматово наибольшие расходы наблюдаются в апреле и составляют 20,10 м³/с, а наименьшие в январе – 1,18 м³/с. В районе п. Тимашево наибольшие расходы наблюдаются в апреле и составляют 198,5 м³/с, а наименьшие в январе – 16,30 м³/с.

Таблица 2. Расходы воды р. Б. Кинель, м³/с

Расход воды	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Водомерный пост – с. Азаматово (374 км от устья)												
Q	1,18	1,19	2,47	20,10	3,14	1,83	1,58	1,33	1,30	1,39	1,44	1,28
Q _{max}	2,74	2,27	21,0	45,40	10,40	4,04	3,92	2,89	2,66	2,90	3,18	2,73
Q _{min}	0,37	0,10	0,07	4,70	0,69	0,25	0,14	0,27	0,23	0,32	0,43	0,48
Водомерный пост – п. Тимашево (74 км от устья)												
Q	17,70	16,30	25,10	198,50	74,20	30,70	25,40	21,50	19,90	20,60	21,50	20,10
Q _{max}	45,40	41,20	112,0	458,0	319,0	56,20	47,80	39,70	39,50	45,30	74,50	60,40
Q _{min}	7,61	7,57	7,30	53,90	20,0	9,0	6,80	7,90	8,0	8,10	7,80	9,0

Характерной фазой водного режима р. Б. Кинель является весеннее половодье, во время которого проходит 59 % годового водного стока, но эта величина может меняться от 30 до 74 %. Продолжительность стояния максимального уровня воды составляет менее суток. Весеннее половодье проходит в апреле – мае, а его пик чаще всего приходится на середину апреля. В среднем продолжительность весеннего половодья составляет 37 суток, при раннем половодье его продолжительность достигает 52 суток, а при позднем уменьшается до 25 суток. После весеннего половодья на реке устанавливается устойчивая и продолжительная межень, в течение которой наблюдаются самые низкие уровни воды в году.

Анализ расходов воды р. Б. Кинель в районе водозабора г. Отрадный показывает, что данная река является ненадежным источником питьевого водоснабжения. Межгодовые колебания расходов воды в меженный период весьма значительны и изменяются в 6–7 раз. Самый неблагоприятный для водоснабжения период – это июль месяц, когда средние месячные расходы воды уменьшались до 6,80 м³/с.

Резкое снижение суточных расходов воды наблюдалось 31 декабря 1976 г., когда его величина составила 3,60 м³/с. Наименьший суточный расход воды за весь период наблюдений был зафиксирован 25 октября 1940 г. и составил 0,50 м³/с.

Формирование качества воды в бассейне р. Б. Кинель имеет свои особенности. Бассейн реки асимметричен по форме: рельеф левобережья отличается мягкостью очертаний и меньшей расчлененностью, а правобережье относительно высокое и сильно расчленено, отмечены обнажения скальных пород. В период весеннего половодья наблюдается интенсивное обрушение берегов, сложенных суглинистым грунтом, что обуславливает повышение мутности воды.

По данным предыдущих исследований [Селезнев и др., 2016; Селезнева и др., 2016] вода р. Б. Кинель характеризуется повышенной минерализацией и жесткостью, низкой прозрачностью и по химическому составу является гидрокарбонатно-кальциевой. В бассейне р. Б. Кинель имеются выходы известняков, мергелей и глин с включением песков и песчаников. Неслучайно воды грунтового происхождения на водосборе отличаются высокой минерализацией и преобладанием сульфатных ионов.

На сезонную изменчивость концентрации веществ в воде оказывают влияние генетические категории вод местного стока. В период весеннего половодья в реке формируются почвенно-поверхностные воды в результате стекания атмосферных вод по ручейковой сети с водосборной территории. В период летне-осенней межени в реке формируются почвенно-грунтовые воды, соответствующие периоду стекания вод из толщи почво-грунтов по водоупорам. В период зимней межени в реке формируются грунтовые воды, соответствующие периоду стекания инфильтрационных вод из водоносных горизонтов, расположенных в толще грунтов.

Средняя годовая минерализация воды в р. Б. Кинель в районе водозабора г. Отрадного составляет 1094 мг/дм³. Наибольшая сезонная концентрация наблюдалась в конце зимней межени и составила 1322 мг/дм³, а наименьшая – в период половодья, 516 мг/дм³ (табл. 3). Сезонная амплитуда колебаний достигает 806 мг/дм³. Практически в течение всего года минерализация воды в реке выше 1000 мг/дм³ и не соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к источникам питьевого водоснабжения [СанПиН 2.1.5.980-00].

По содержанию органических веществ по химическому потреблению кислорода (ХПК) вода в реке в течение всего года не соответствует нормативным требованиям, то есть превышает 15 мгО/дм³. Средняя годовая концентрация ХПК составляет 25,6 мгО/дм³. Наибольшая внутригодовая концентрация – 27,3 мгО/дм³, а наименьшая – 22,8 мгО/дм³. Сезонная амплитуда колебаний составляет 4,8 мгО/дм³. Основной причиной чрезмерного органического загрязнения (по ХПК) является сброс городских сточных вод в реку от городов Бугуруслана, Похвистнево, Отрадного и Кинеля, а также разработка нефтяных и газовых месторождений в бассейне р. Б. Кинель. Суммарный объем сброса загрязненных сточных вод в бассейн р. Б. Кинель составляет ~10 млн м³.

Таблица 3. Концентрация веществ в воде р. Б. Кинель, г. Отрадный

Месяцы												ПДК	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Минерализация, мг/дм ³													
1240	1292	1322	516	950	1109	1121	1074	1066	1129	1122	1190	1000	
Химическое потребление кислорода (ХПК), мгО/дм ³													
24,0	23,9	27,3	25,3	25,1	27,1	26,1	27,3	27,0	26,7	24,0	22,8	15	
Биохимическое потребление кислорода (БПК ₅), мгО ₂ /дм ³													
2,37	2,90	3,03	2,54	2,71	3,09	4,00	4,08	2,19	2,01	2,38	2,59	2,0	
Сульфаты (SO ₄ ²⁻), мг/дм ³													
357	371	377	167	220	301	307	334	286	310	317	307	500	
Хлориды (Cl), мг/дм ³													
84,0	88,5	97,4	42,7	54,2	68,6	70,9	77,6	72,0	69,3	71,5	82,2	350	
Нитраты (NO ₃ ⁻), мгN/дм ³													
3,95	3,15	3,13	2,30	1,60	1,13	1,70	1,20	2,55	3,17	3,90	3,75	9,1	
Фосфаты (PO ₄ ³⁻), мгP/дм ³													
0,092	0,085	0,140	0,100	0,099	0,065	0,04	0,035	0,062	0,125	0,085	0,099	3,5	
Медь (Cu), мг/дм ³													
0,004	0,006	0,003	0,006	0,004	0,006	0,004	0,006	0,005	0,005	0,004	0,004	1,0	
Цинк (Zn), мг/дм ³													
0,008	0,010	0,009	0,005	0,008	0,009	0,008	0,007	0,011	0,009	0,009	0,007	1,0	
Нефтепродукты, мг/дм ³													
0,080	0,091	0,037	0,052	0,025	0,032	0,069	0,099	0,053	0,025	0,020	0,045	0,05	

Примечание. ПДК – по: [ГН 2.1.5.1315-03; ГН 2.1.5.2280-07].

Вода р. Б. Кинель характеризуется повышенным содержанием нефтепродуктов. Средняя годовая концентрация нефтепродуктов составляет 0,052 мг/дм³. Наибольшая концентрация наблюдается в августе (0,099 мг/дм³), а наименьшая – в ноябре (0,020 мг/дм³).

Содержание легко окисляемых органических веществ в воде р. Б. Кинель по биохимическому потреблению кислорода (БПК₅) не соответствует нормативным требованиям (2,0 мгО₂/дм³) в течение всего года. Среднегодовое значение БПК₅ составляет 2,82 мгО₂/дм³, наибольшее – 4,08 мгО₂/дм³, а наименьшее – 2,19 мгО₂/дм³.

Среднее годовое содержание сульфатов (SO₄²⁻) в воде реки составляет 305 мг/дм³. Наибольшая концентрация (SO₄²⁻) наблюдается в конце зимней межени (377 мг/дм³), а наименьшая – в период половодья (167 мг/дм³).

Среднее годовое содержание хлоридов (Cl⁻) в воде реки составляет 73,2 мг/дм³. Максимальная концентрация Cl⁻ наблюдается в конце зимней межени (97,4 мг/дм³), а минимальная – в период половодья (42,7 мг/дм³). В период весеннего половодья вследствие разбавления талыми водами концентрация сульфатов и хлоридов в русловых водах резко падает.

Средняя годовая концентрация меди в воде р. Б. Кинель составляет 0,005 мг/дм³. Сезонный ход содержания меди не прослеживается. Наибольшая концентрация составляет 0,006 мг/дм³, а наименьшая – 0,003 мг/дм³.

Средняя годовая концентрация цинка в воде реки составляет 0,008 мг/дм³. Сезонный ход не прослеживался. Наибольшая концентрация составляет 0,011 мг/дм³, а наименьшая – 0,005 мг/дм³.

Средняя годовая концентрация нитратов (NO₃²⁻) в воде реки составляет 2,63 мгN/дм³. Наибольшая внутригодовая концентрация наблюдается в зимний период (3,95 мгN/дм³), а наименьшая – в период летней межени (1,20 мгN/дм³).

Средняя годовая концентрация фосфатов (PO₄³⁻) в воде реки составляет 0,086 мгP/дм³. Наибольшая концентрация наблюдается в марте (0,140 мгP/дм³), а наименьшая – в период летней межени в августе (0,035 мгP/дм³).

Основная причина повышенного содержания нитратов и фосфатов в воде р. Б. Кинель – это воздействие диффузных источников загрязнения: сельскохозяйственных угодий и скотоводческих ферм, расположенных в бассейне реки. Бассейн р. Б. Кинель – крупный аграрный регион с благоприятными природно-климатическими условиями для производства высококачественного зерна, подсолнечника, картофеля, овощей. Земельные ресурсы в бассейне почти полностью заняты сельскохозяйственными угодьями. Из них пашня занимает 75 % и пастбища – 20 %. Определенный вклад в загрязнение водотоков вносят свалки и животноводческие фермы.

Анализ качества воды р. Б. Кинель в районе питьевого водозабора г. Отрадный показывает, что данная река является рискованным источником питьевого водоснабжения для населения. Качество воды в течение всего года в местах питьевого пользования не соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к источникам хозяйственно-питьевого водопользования по минерализации, жесткости и ХПК. Периодически качество воды не соответствует по мутности, БПК₅ и нефтепродуктам. В воде содержится повышенное содержание сульфатов и нитратов.

В зависимости от качества воды и требуемой степени ее обработки до показателей питьевой воды поверхностные водные объекты, пригодные в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения, делят на 3 класса [ГОСТ 2761-84, 2010]. Из-за несовершенства классификации поверхностных источников водоснабжения (в определении класса используется всего 9 физико-химических показателей качества воды) р. Б. Кинель следует отнести к поверхностным источникам водоснабжения 1-го класса, что предполагает минимальную водоподготовку: обеззараживание и фильтрование с коагулированием. Однако подобная технология не способна довести речную воду р. Б. Кинель до нормативных требований [СанПиН 2.1.4.1074-01], предъявляемых к питьевой воде.

Список литературы

ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Зарегистрированы Минюстом России № 4550 от 19.05.2003 г.

ГН 2.1.5.2280-07 к ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, № 50 от 10 декабря 2007 г.

ГОСТ 2761-84. Источники хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора. М.: Изд-во стандартов, 2010. 20 с.

СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. М.: Минздрав России, 2002.

СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод: Санитарные правила и нормы. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000.

Селезнев В. А., Селезнева А. В., Беспалова К. В. Водоснабжение из эвтрофированных источников (проблемы и пути решения) // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2014. № 6(78). С. 66–70.

Селезнев В. А., Селезнева А. В., Беспалова К. В. Состояние реки Большой Кинель // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф.: в 5 томах. 2016. С. 206–210.

Селезнева А. В. От мониторинга к нормированию антропогенной нагрузки на водные объекты. Самара: СамНЦ РАН, 2007. 107 с.

Селезнева А. В., Беспалова К. В., Селезнев В. А. Река Большой Кинель: гидрологические условия и качество воды // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2016. Т. 25, № 1. С. 176–180.

FORMATION AND QUALITY OF WATER RESOURCES OF THE BOLSHOY KINEL RIVER

K. Bespalova

Institute of the Volga Basin Ecology RAS – branch of Samara Federal Research Centre RAS, Tolyatti

The results of expeditions for the study of the water resources of the Bolshoy Kinel River, which is a source of drinking water for urban population of the Samara Region, are presented. The analysis of interannual and seasonal variations in the river's discharge rate at Otradny municipal water intake facility suggests that the river is an unreliable source for drinking water supply. Interannual fluctuations of the discharge rate during the low-water period are very significant (6–7-fold). The most unfavorable period for water supply is the month of July, when mean monthly discharge rates have dropped to 6.8 m³/s. Throughout the year, the quality of water in the river does not fulfill the regulatory requirements for sources of drinking water in what concerns TDS content, hardness and COD. Non-conformance is occasionally observed for turbidity, BOD, and hydrocarbons. The water contains elevated amounts of sulfates and nutrients, especially nitrates.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОД СУШИ

М. В. Зобкова, Н. Е. Галахина, Т. А. Ефремова, М. Б. Зобков

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

Представлена адаптированная и верифицированная методика определения содержания микропластика в донных отложениях вод суши. Внедренные изменения позволяют выделять антропогенные частицы размером от 0,2 до 5 мм флотацией в растворе формиата калия при высоком содержании органического вещества. Эффективность экстракции АРР частиц в среднем составляет $92 \pm 8 \%$ ($n = 20$).

Загрязнение водной среды микропластиком является актуальной экологической проблемой общепланетарного масштаба. Однако до сих пор отсутствуют стандартизированные методики отбора и анализа этих антропогенных частиц в воде и донных отложениях, что затрудняет оценку такого типа загрязнения. Основной проблемой при выделении микропластика из природных

матриц является отделение антропогенных частиц от содержащихся в пробе песка, ила и других осадочных материалов, органических компонентов и других частиц природного и антропогенного происхождения (щепки, уголь, стекло и др.).

Предложена методика, позволяющая выделять микропластик из донных отложений вод суши и анализировать его при помощи микроскопа. При этом частицы микропластика должны иметь размер от 0,2 до 5 мм, быть устойчивыми в среде перексида водорода, подвергаться флотации в растворе формиата калия ($\rho = 1,5$ г/мл) и визуально идентифицироваться под микроскопом как микропластик. Настоящая методика базируется на лабораторных методах анализа микропластика в морской среде по программе исследования морского мусора NOAA [Masura et al., 2015] с модификациями [Zobkov, Esiukova, 2017].

Методика включает в себя следующие этапы:

- влажное окисление пробы в среде перексида водорода;
- фильтрацию окисленной пробы через каскад из трех фильтров (размер ячеек 333, 174 и 100 мкм) для удаления мелкоалевритовой фракции;
- плотностное разделение пробы в растворе формиата калия (отделение частиц микропластика, органического вещества и других легких фракций от тяжелого осадка);
- окисление органического вещества перексидом водорода в присутствии катализатора Fe(II);
- разложение хитиновых и минеральных веществ в кислой среде;
- дополнительное плотностное разделение (при наличии большого количества песка);
- фильтрацию и сушку;
- идентификацию микропластика с помощью микроскопа;
- для подтверждения полимерного состава выделенных пластинок рекомендуется использовать Рамановскую спектроскопию, микро-ИК-Фурье спектроскопию или ИК-Фурье спектроскопию с ячейкой НПВО.

Частицы микропластика присутствуют в окружающем воздухе и могут попадать в пробы, а при фильтрации и перемещении пробы может происходить потеря материала. Поэтому при проведении анализа необходимым является внутренний контроль качества анализа. Контроль внешнего загрязнения осуществляется при помощи холостых проб (одна на партию из 5–6 проб). Для этого на все время фильтрации пробы на крышку чашки Петри кладут чистый смоченный дистиллированной водой круглый фильтр, после чего его подвергают тем же манипуляциям, что и фильтры с пробами (окисление, сушка и анализ под микроскопом). Возможная потеря материала при анализе контролируется по эффективности выделения искусственных частиц (artificial reference particles, ARP) [Zobkov, Esiukova, 2017] из донных отложений. Для этого в каждую пробу перед началом анализа необходимо добавлять по 20 шт. ARP частиц флуоресцентного полиэтилентерефталата. Подсчет выделенных частиц следует вести на этапе плотностного разделения с помощью УФ-лампы и при идентификации микропластика на фильтрах с использованием микроскопа.

Водные объекты суши отличаются высоким содержанием органического вещества по сравнению с морскими, для которых аналогичные методики были разработаны ранее [Masura et al., 2015; Zobkov, Esiukova, 2017]. Поэтому для повышения эффективности отделения частиц микропластика от мешающих определению компонентов было внедрено несколько изменений.

Во-первых, был добавлен этап предварительного окисления органического вещества 30 % раствором H_2O_2 , позволяющим разрушить устойчивые связи между частицами осадка и пластика. В результате предыдущих исследований [Cauwenberghe et al., 2015] было установлено, что частицы микропластика в водной среде обрастают биологическими формами (организмами) и агрегируют с более плотным осадочным веществом, что способствует их захоронению в донных осадках за счет изменения удельной плотности. Предложенная процедура позволяет окислить органическое вещество на поверхности частиц и разорвать связь с более плотными частицами осадка, что способствует их отделению от осадка при плотностном разделении.

Во-вторых, для удаления мелкоалевритовых фракций размером меньше 100 мкм, мешающих плотностному разделению, фильтрация пробы донных отложений осуществлялась через каскад из трех фильтров с размерами ячеек 333, 174 и 100 мкм, соответственно. Проба постепенно фильтровалась и промывалась дистиллированной водой до тех пор, пока на каждом фильтре не оставалась только та часть осадка, которая не проходит через данную ячейку. Для более быстрой фильтрации мелкоалевритовые фракции предварительно переводились в суспендированное состояние путем добавления к осадку дистиллированной воды.

Еще одно изменение связано с использованием раствора формиата калия (HCOOK , $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$) для плотностного разделения вместо хлорида цинка ($\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$), применяемого в работе [Zobkov, Esiukova, 2017]. Чаще всего для отделения частиц микропластика от более плотных нерастворимых минеральных фрагментов применяют раствор хлорида натрия плотностью $1,2 \text{ г/мл}$ [Hidalgo-Ruz et al., 2012], однако также популярны и другие растворы с большей плотностью, среди которых: хлорид цинка [Imhof et al., 2012; Zobkov, Esiukova, 2017], йодид натрия [Cauwenberghe et al., 2013; Claessens et al., 2013] и метавольфрамат лития [Masura et al., 2015]. Формиат калия, ранее применявшийся только в одной работе [Zhang et al., 2016], обладает рядом преимуществ. Он не токсичен, дешев, легкодоступен, имеет достаточную плотность раствора для выделения не только легких пластиков, но и полимеров с высокой удельной плотностью, таких, как поливинилхлорид (PVC, $\rho = 1,4\text{--}1,56 \text{ г/мл}$) и полиэтилентерефталат (PET, $\rho = 1,32\text{--}1,41 \text{ г/мл}$).

Эффективность предложенных изменений подтверждается высокой степенью извлечения ARP частиц из донных отложений, которая в среднем составила $92 \pm 8 \%$ ($n = 20$), что не уступает исходной методике [Zobkov, Esiukova, 2017].

В результате анализа на каждую пробу приходится 4–6 фильтров, на поверхности которых при помощи микроскопа идентифицируют микропластик в соответствии с рекомендациями [Norén, 2007]:

- клеточная структура и другие органические формы у частиц отсутствуют;
- волокна должны иметь равномерную толщину по всей длине;
- частицы должны иметь равномерный цвет;
- если они прозрачны или имеют белый цвет, то их необходимо рассматривать под большим увеличением.

Определяют тип и цвет пластиковой частицы и проводят измерение его размеров как для пробы донных осадков, так и для холостой пробы. Выявленные частицы пластиков классифицируют как волокна, гранулы, фрагменты и пленки [Zobkov, Esiukova, 2017]. Затем все частицы, обнаруженные на всех фильтрах, суммируют по типу и цвету. Поправка на холостое определение рассчитывается как разница между количеством частиц, обнаруженных в пробе, и количеством частиц соответствующего типа и цвета, найденных в холостой пробе. Рассчитывают концентрацию микропластика в донных осадках (C , шт./кг сух. веса осадка) по следующей формуле:

$$C = \frac{N_{\text{проба}} \cdot 100 \%}{m_{\text{пробы}}(100 - W)},$$

где $N_{\text{проба}}$ – количество всех типов и цветов частиц микропластика в пробе, шт.; m – масса пробы, кг; W – влажность пробы, %.

Важной составляющей данного анализа является минимизация внешнего загрязнения пробы. Поэтому при его выполнении следует исключить использование посуды и другого оборудования из пластика. Наиболее приемлемыми являются неокрашенные металл, стекло, дерево. Все фильтры, используемые для анализа, необходимо предварительно промывать, сушить, проверять под микроскопом на предмет отсутствия загрязнения и хранить завернутыми в фольгу. Чтобы избежать загрязнения частицами микропластика, находящимися в воздухе, обработку пробы желательнее проводить в комнате с очищенным воздухом или в ламинарном шкафу, который хорошо себя зарекомендовал [Schymanski et al., 2018; Wang et al., 2018]. Кроме того, необходимо периодически проводить влажную уборку помещения, а в качестве спецодежды использовать халаты из хлопка.

Для оценки степени извлечения частиц микропластика из донных осадков по представленной методике было проведено исследование, в ходе которого проводилось многократное плотностное разделение пробы формиатом калия. Для этого были взяты 4 образца донных отложений из различных районов Онежского озера: W2 – Повенецкий залив, GU – Уницкая губа, K3 – Кондопожская губа и S5 – р. Свирь (исток из озера). По гранулометрическому составу донные отложения на станциях W2 и GU относятся к глинисто-песчаным алевритам с преобладанием мелко-алевритовой фракции (0,01–0,05 мм), как и K3, донные отложения которой загрязнены взвешенным материалом сточных вод Кондопожского ЦБК, а на станции S5 превалирует песчаная фракция.

Из каждого образца были выделены частицы микропластика по описанной выше методике. Для этого этап плотностного разделения повторяли трижды: осадок заливали раствором формиата калия, перемешивали и отстаивали в течение 3–4 суток, а затем раствор HCOOK , содержащий всплывшие частицы микропластика, фильтровали, после чего отфильтрованный раствор вновь приливали к оставшемуся осадку. Данную процедуру повторяли еще дважды.

Фильтры, содержащие частицы микропластика, после каждого этапа окисляли, сушили и анализировали под микроскопом.

Результаты экспериментального исследования позволили рассчитать процентное соотношение выделенных частиц микропластика на каждом этапе. Для всех образцов отмечается закономерное уменьшение содержания частиц от первого этапа к третьему (рис. 1). Что касается экстракции различных типов микропластика, то на всех этапах на станциях W2, GU и S5 преобладали волокна. Исключение составила станция K3, на которой преобладали гранулы (рис. 2), что объясняется антропогенным воздействием Кондопожского ЦБК на вершинную часть губы. Количество пленок и волокон было значительно меньше на всех станциях. Следует отметить, что эффективность экстракции по ARP составила 95–100 %.

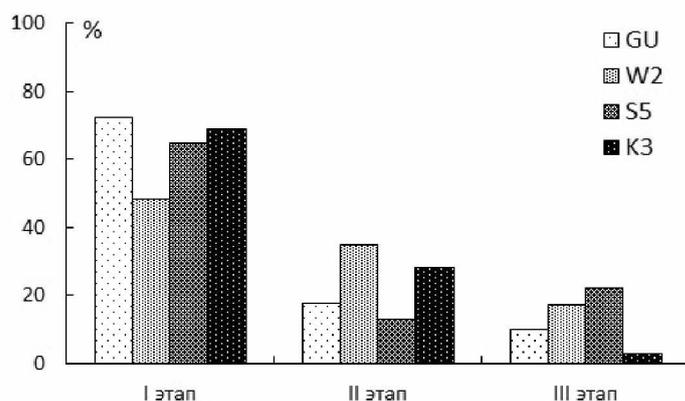


Рис. 1. Соотношение частиц микропластика, выделенных на каждом этапе, к общему количеству частиц в образце

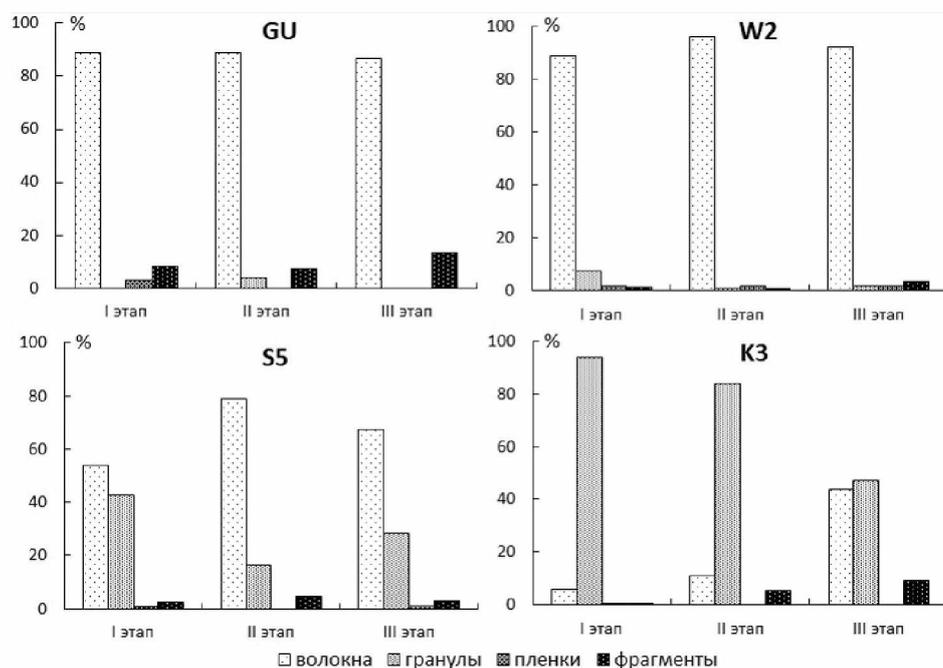


Рис. 2. Соотношение различных форм микропластика к общему количеству частиц, выделенных на каждом этапе, в различных образцах донных осадков Онежского озера

Таким образом, адаптирована и верифицирована методика определения микропластика в донных отложениях поверхностных вод суши, позволяющая выделять и определять под микроскопом частицы размером от 0,2 до 5 мм, устойчивые к разложению в среде перексида водорода и поддающиеся флотации в формиате калия. Эффективность методики подтверждается по внутреннему контролю ARP частиц и исследованию по многократной экстракции микропластика.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект №19-17-00035).

Список литературы

- Cauwenberghe L. V., Devriese L., Galgani F., Robbens J., Janssen C. R.* Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects // *Mar. Environ. Res.* 2015. Vol. 111. P. 5–17.
- Cauwenberghe L. V., Vanreusel A., Mees J., Janssen C. R.* Microplastic pollution in deep-sea sediments // *Environ. Pollut.* 2013. Vol. 182. P. 495–499.
- Claessens M., Cauwenberghe L., Vandegehuchte M. B., Janssen C. R.* New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms // *Mar. Pollut. Bull.* 2013. Vol. 70. P. 227–233.
- Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R. C., Thiel M.* Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification // *Environ. Sci. Technol.* 2012. Vol. 46, N 6. P. 3060–3075.
- Imhof H. K., Schmid J., Niessner R., Ivleva N. P., Laforsch C.* A novel, highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 2012. Vol. 10, N JULY. P. 524–537.
- Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C.* Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48, 2015.
- Norén F.* Small plastic particles in coastal Swedish waters. 2007. KIMO Report.
- Schymanski D., Goldbeck C., Humpf H. U., Fürst P.* Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water // *Water Res.* 2018. Vol. 129. P. 154–162.
- Wang W., Yuan W., Chen Y., Wang J.* Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China // *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 633. P. 539–545.
- Zhang K., Su J., Xiong X., Wu X., Wu C., Liu J.* Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China // *Environ. Pollut.* 2016. Vol. 219. P. 450–455.
- Zobkov M. B., Esiukova E. E.* Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results // *Mar. Pollut. Bull.* 2017. Vol. 114, N 2. P. 724–732.

A TECHNIQUE FOR MICROPLASTICS CONTENT DETERMINATION IN INLAND WATER SEDIMENTS

M. Zobkova, N. Galakhina, T. Efremova, M. Zobkov

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

A modified method for microplastics extraction from lake sediments is proposed. The method enables the separation of microplastics in a size range from 0.2 to 5 mm from organic-rich sediments by flotation in potassium formate solution. The method showed high extraction efficiency using artificial reference particles (92 ± 8 %).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕКЕ ВЕЛИКОЙ

М. А. Макарова, В. А. Шелутко

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Работа посвящена вопросам оценки сезонной динамики стока биогенных веществ по реке Великой за период 1969–2009 гг. По графикам пространственно-временной изменчивости рассматриваемых элементов определена антропогенная составляющая формирования стока биогенных элементов. Отмечено возрастание биогенной нагрузки на водоток от истока к устью реки.

Урбанизация естественных территорий оказывает с каждым годом все большее воздействие на окружающую природную среду. Сток загрязняющих веществ с городских территорий в количественном и качественном отношении резко отличается от стока с естественных водосборов. Это выражается,

прежде всего, в том, что города характеризуются состоянием проницаемости поверхности. Асфальтовые покрытия не позволяют поверхностному стоку переходить в подземный, что нарушает естественный гидрологический режим территории. Также следует отметить: сток с городских территорий отличается повышенным содержанием загрязняющих веществ, что напрямую влияет на качество природных вод, протекающих в городской черте и за ее пределами ниже по течению.

Для оценки качества вод используются различные методы, позволяющие выявить закономерности процессов антропогенной деградации водных объектов. Данные методы основаны на анализе исходной информации, и, несомненно, важную роль играют методы ее статистической обработки [Макарова, Шелутко, 2019].

В этой связи целью работы является статистическая оценка сезонной динамики концентраций биогенных элементов в стоке р. Великой.

Выбор объекта исследования обусловлен его хорошей гидрологической изученностью и продолжительными рядами данных, освещенными многолетним периодом наблюдений. Река Великая, относящаяся к системе водных объектов Балтийского бассейнового округа, берет свое начало на Бежаницкой возвышенности в северо-восточной части Псковской области и впадает в Псковско-Чудскую озерную систему в 4 км западнее деревни Муравицы. Длина реки 430 км, а площадь водосбора 25 200 км² [СКИОВО]. На р. Великой находятся три стационарных гидрохимических поста наблюдательной сети Росгидромета, располагающиеся рядом с городами Опочка, Остров и Псков. Каждый из них содержит по два створа – выше и ниже городской черты.

В качестве материалов исследований использованы многолетние данные наблюдений за концентрациями азота нитратного (N-NO₃⁻), азота аммонийного (N-NH₄⁺), общего железа (Fe_{общ}), а также за показателем биохимического потребления кислорода за 5 суток (БПК₅). Данные предоставлены Северо-Западным Управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС).

Для проведения оценки сезонной динамики исходные данные, представленные 24 рядами наблюдений за гидрохимическим режимом реки, были приведены в виде матрицы данных по годам и месяцам для каждого пункта наблюдений и рассматриваемого биогенного элемента. Поскольку отбор проб в водотоке согласно установленной программе гидрохимических наблюдений проводился в основные фазы водного режима, что свидетельствует о неоднородности данных по числу измерений в год, возникла необходимость в выявлении месяцев, наиболее обеспеченных эмпирической информацией. Как показали результаты, наибольшее количество измерений проводилось в апреле и октябре. Следует отметить, что в проведенных ранее исследованиях [Макарова, Шелутко, 2019] в исходных рядах данных были выявлены так называемые выбросы, которые представляют собой значения, резко отличающиеся от основного массива данных. В ряде работ [Шелутко, 2002; Урусова, 2017] показана необходимость исключения выбросов из исходных рядов данных в силу их исключительного влияния на распределение выборочных совокупностей. В данном случае было принято решение восстановить исходные значения концентраций, отнесенные к группе выбросов, на основе методов корреляционного анализа. В результате было доказано влияние наличия выбросов на значения рассмотренных концентраций биогенов (рис. 1). Числами отмечен прирост значений концентраций по сравнению с отсутствием в ряду выброса.

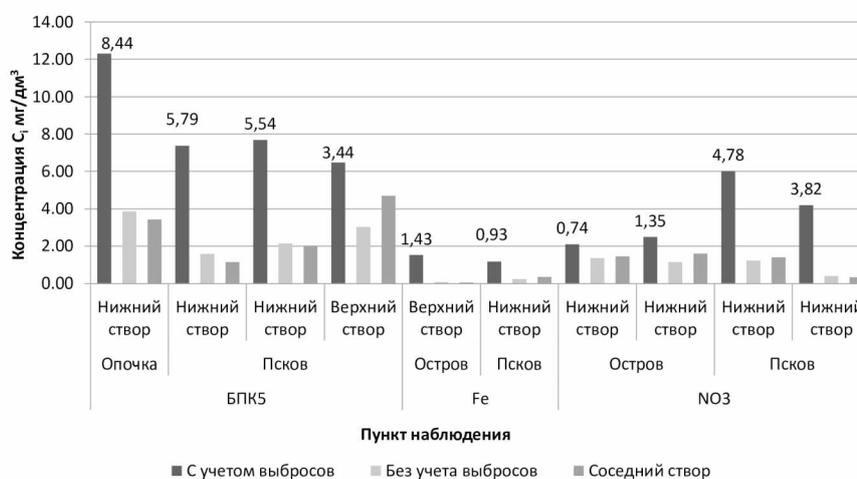


Рис. 1. Влияние выбросов на значения концентраций биогенных элементов в стоке р. Великой

Как показано на рис. 1, во всех случаях при исключении выбросов происходит существенное уменьшение концентраций рассмотренных биогенных элементов. При этом они приближаются к значениям концентраций в соседнем створе, и становится возможным дать предварительную оценку вклада урбанизированных территорий в биогенную нагрузку на водоток.

В дальнейшем анализе сезонной динамики концентраций биогенных элементов были использованы восстановленные значения.

Для выборочных совокупностей концентраций, измеренных в апреле и октябре, были построены графики временной динамики (рис. 2).

По графикам, представленным на рис. 2, можно отметить возрастание значений концентраций азота аммонийного $N-NH_4$ от истока к устью пропорционально увеличению уровня антропогенной нагрузки. Избыточному накоплению $N-NH_4$ способствует поступление сточных вод городского промышленного и коммунального хозяйства. Наибольшие концентрации наблюдаются в период с 1969 по 1981 г. Резкое снижение их после 1981 г. связано с модернизацией системы очистки сточных вод на очистных сооружениях канализации.

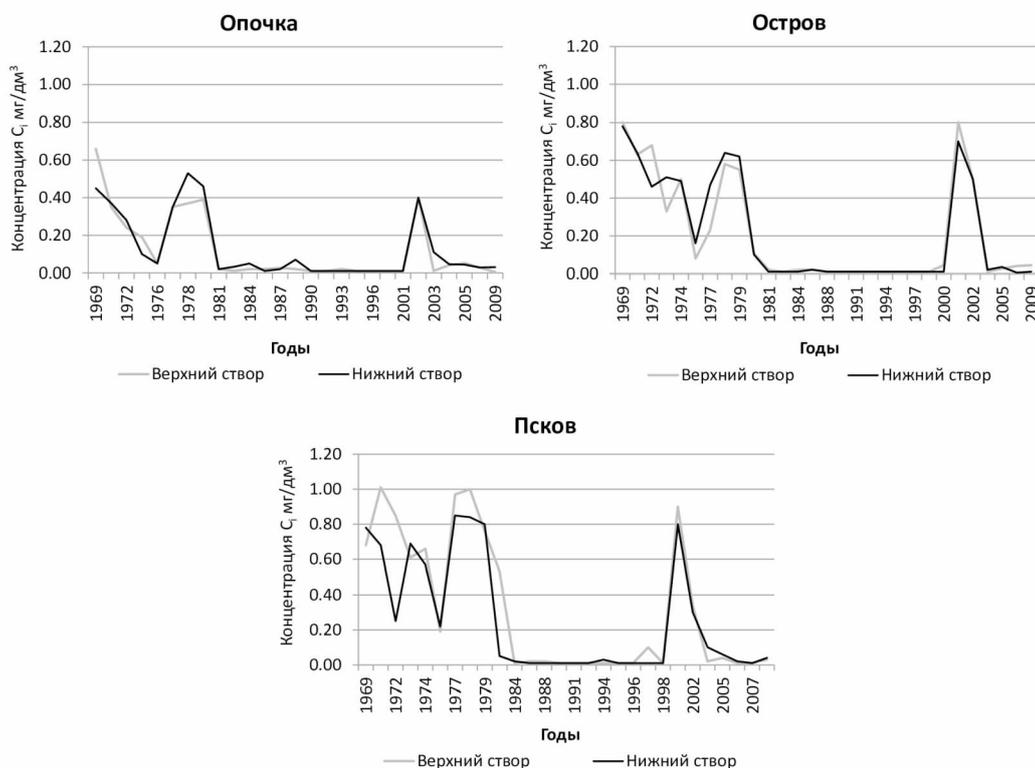


Рис. 2. Графики пространственно-временной динамики рядов концентраций азота аммонийного $N-NH_4$ по длине р. Великой (апрель 1969–2009 гг.)

Для большинства лет характерно увеличение концентраций в нижнем створе по сравнению с верхним, что свидетельствует о влиянии урбанизированных территорий. Для рядов концентраций азота нитратного ($N-NO_3^-$) общего железа ($Fe_{общ}$) и показателя БПК₅ тенденция сохраняется. В некоторые годы отмечается превышение концентраций в верхнем створе по сравнению с нижним, что может быть вызвано неблагоприятными климатическими явлениями. В результате этого обстоятельства снижается уровень воды в реке и связанная с ним степень разбавления, а следовательно, возрастает концентрация растворенных в воде веществ. Этим также объясняется экстремальное увеличение концентраций, как в нижнем, так и в верхнем створе, зафиксированное в 2001–2002 гг. по всей длине реки.

Также следует отметить, что синхронность многолетних колебаний измеренных значений концентраций общего железа ($Fe_{общ}$) наибольшая из рассмотренных рядов. Графики их временной изменчивости практически повторяют друг друга во всех трех пунктах наблюдений.

Оценка числовых характеристик рядов наблюдений за концентрациями, измеренными в апреле и октябре, приведенных в таблице, позволила выявить некоторые особенности их распределения.

Во-первых, средние многолетние значения концентраций в рядах наблюдений за азотом аммонийным ($N-NH_4^+$) и азотом нитратным ($N-NO_3^-$) не превышают ПДК. Однако по длине реки концентрации соединений азота увеличиваются, то есть максимальную нагрузку от биогенного загрязнения испытывает устьевая часть р. Великой. Избыточному накоплению этих биогенных элементов способствует интенсификация поступления промышленных и сельскохозяйственных стоков.

Оценки числовых характеристик концентраций биогенных веществ в р. Великой
(апрель – октябрь 1969–2009 гг.)

Пункт наблюдения	Биоген	Створ	Оценки						ПДК ₃ мг/дм ³
			Апрель			Октябрь			
			m_x	σ_x	C_s	m_x	σ_x	C_s	
Опочка	$N-NH_4^+$	Верхний	0,12	0,18	1,57	0,05	0,07	2,72	0,4
		Нижний	0,13	0,17	1,27	0,06	0,08	2,45	
	БПК ₅	Верхний	2,05	0,90	0,66	1,63	0,72	0,13	2,1
		Нижний	2,34	0,96	0,20	1,94	0,92	0,47	
	Fe _{общ}	Верхний	0,10	0,10	1,98	0,08	0,10	2,13	0,1
		Нижний	0,10	0,10	1,10	0,09	0,09	1,85	
	$N-NO_3^-$	Верхний	0,57	0,36	0,97	0,23	0,27	2,65	9
		Нижний	0,64	0,38	0,69	0,23	0,18	1,07	
Остров	$N-NH_4^+$	Верхний	0,21	0,28	1,06	0,09	0,24	4,65	0,4
		Нижний	0,22	0,28	0,82	0,16	0,36	3,13	
	БПК ₅	Верхний	1,67	0,66	0,29	1,43	0,61	0,65	2,1
		Нижний	2,01	1,14	1,99	1,98	0,99	1,88	
	Fe _{общ}	Верхний	0,18	0,13	0,94	0,12	0,14	2,74	0,1
		Нижний	0,18	0,13	0,79	0,12	0,16	2,67	
	$N-NO_3^-$	Верхний	0,61	0,45	0,57	0,23	0,16	1,66	9
		Нижний	0,71	0,60	1,45	0,23	0,13	0,94	
Псков	$N-NH_4^+$	Верхний	0,32	0,39	0,76	0,12	0,24	3,77	0,4
		Нижний	0,26	0,33	0,92	0,21	0,33	2,19	
	БПК ₅	Верхний	1,91	0,65	0,78	1,57	0,68	0,32	2,1
		Нижний	1,96	0,60	0,30	1,88	0,81	0,87	
	Fe _{общ}	Верхний	0,19	0,20	1,26	0,18	0,17	1,27	0,1
		Нижний	0,22	0,20	1,26	0,20	0,20	1,22	
	$N-NO_3^-$	Верхний	0,62	0,45	0,81	0,31	0,22	1,51	9
		Нижний	0,73	0,52	0,70	0,32	0,21	1,19	

При этом отмечены превышения ПДК в рядах наблюдений за общим железом (Fe_{общ}) и показателем БПК₅. И если пространственная изменчивость Fe_{общ} имеет сглаженный характер, то изменения значений БПК₅ более выражены. Увеличение значений показателя в пределах городской черты, а затем их понижение до верхнего створа следующего пункта наблюдения явно указывают на вклад в водоток промышленных сточных вод, что подтверждает результаты визуального анализа, проведенного по графикам временной динамики.

Таким образом, урбанизация территорий оказывает весьма многообразное влияние на качество природных вод.

На примере р. Великой показаны особенности сезонной динамики биогенных элементов по трем гидрохимическим створам. Отмечено возрастание значений концентраций от истока к устью пропорционально увеличению уровня антропогенной нагрузки. Наблюдается увеличение концентраций в нижнем створе по сравнению с верхним, что свидетельствует о влиянии городов на вынос биогенов с речным стоком.

Список литературы

Макарова М. А., Шелутко В. А. Методика оценки максимальных значений концентраций биогенных веществ в речном стоке (на примере реки Великая) // Труды III Всерос. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: ХИМИЗДАТ, 2019. С. 571–574.

СКИОВО. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Нарва. Книга 1. Утверждена приказом Невско-Ладожского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов от 27 июня 2014 г. № 82.

Урсова Е. С. Вопросы применения методов статистической обработки данных гидрохимических наблюдений // Метеорологический вестник. 2017. Т. 9, № 2. С. 216–220.

Шелутко В. А. Оценка экстремальных уровней загрязнения речной сети урбанизированных территорий // Вопросы прикладной экологии: сб. науч. тр. СПб.: РГГМУ, 2002. С. 15–23.

ASSESSMENT OF URBAN IMPACT ON THE FORMATION OF THE NUTRIENT FLOW IN THE VELIKAYA RIVER

M. Makarova, V. Shelutko

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

The study aimed to assess seasonal variations in nutrient flow down the Velikaya River over the period 1969–2009. The anthropogenic component of the nutrient flow was identified from the graphs for spatiotemporal variations of the elements in question. The nutrient load on the river was found to increase from the source to the mouth.

ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ В ИСТОКЕ И УСТЬЕ РЕКИ НАРВЫ

Н. В. Никерина^{1,2}, О. В. Задонская¹

¹ *Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург*

² *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Природные фоновые концентрации органических веществ (по БПК₅ и ХПК_{Cr}), биогенных элементов (соединений азота и минеральный фосфор) и ряда металлов были рассчитаны в трех створах трансграничной р. Нарвы, по которой проходит Государственная граница с Эстонией. Верхний створ условно можно отнести к истоку реки (д. Степановщина, 16 км от истока из оз. Чудско-Псковского), два нижних – к устью (0,65 км выше и 4,8 км ниже Нарвской ГЭС, которая находится в 17 км от устья). Полученные концентрации ХПК_{Cr} превышают ПДК в объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования во всех створах, концентрация меди в третьем створе превышает ПДК в объектах рыбохозяйственного значения. Ярко выраженной тенденции к пространственному изменению природных фоновых концентраций не выявлено.

Трансграничное водное сотрудничество зачастую осложняется различными подходами соседствующих стран к водопользованию. Для предотвращения политически сложных конфликтных ситуаций необходимо рациональное использование ресурсов, а также принятие мер по восстановлению водного объекта, находящегося в совместном пользовании. Ничего из перечисленного невозможно при отсутствии сведений о естественном состоянии водного объекта до антропогенного вмешательства. Об этом естественном состоянии можно судить по значениям природных фоновых концентраций веществ, наиболее значимых с точки зрения уязвимости объекта рыбохозяйственного или хозяйственно-питьевого водопользования.

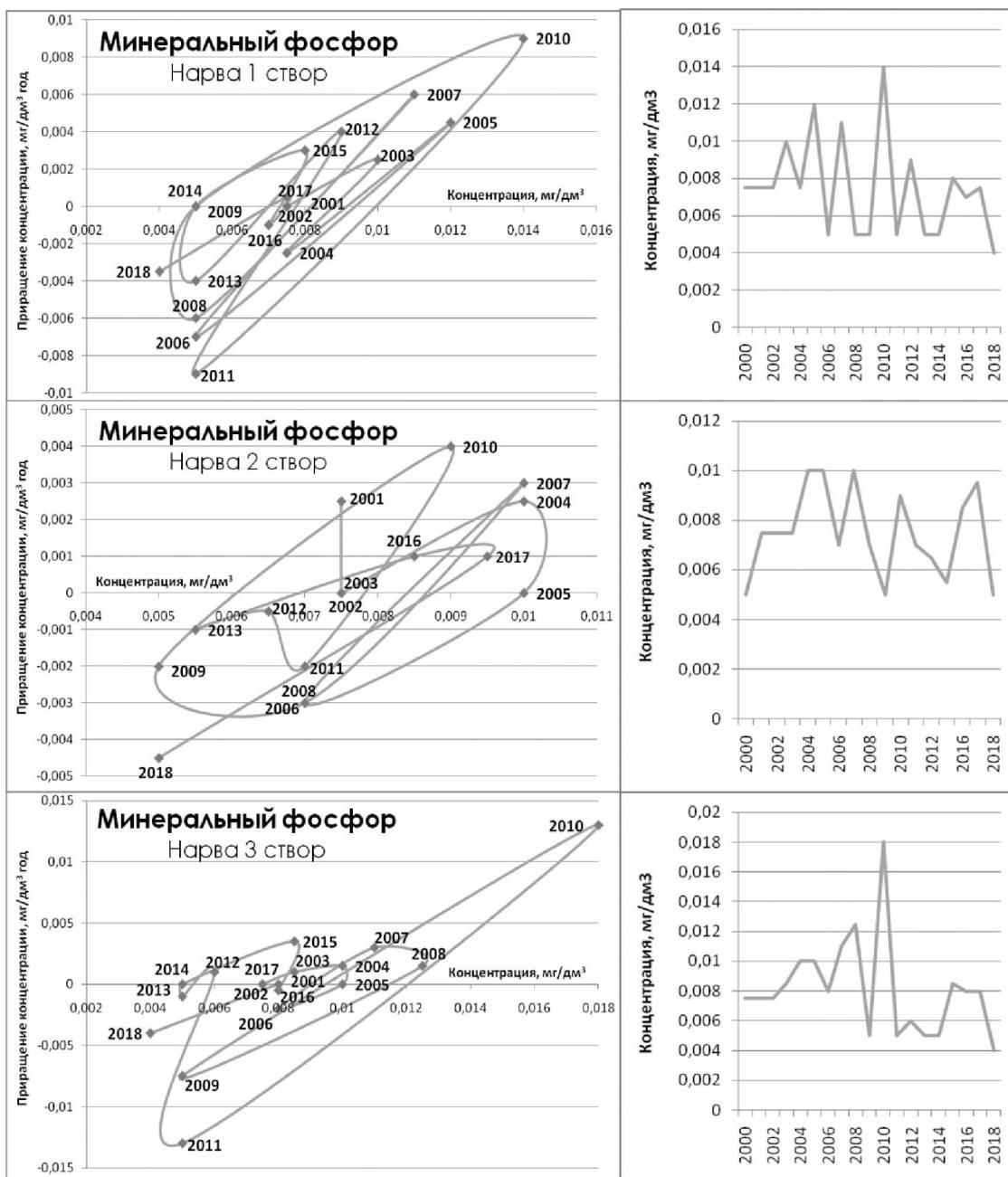
Для р. Нарвы, отделяющей Ленинградскую область Российской Федерации от Эстонии, такими веществами являются органические соединения (определяемые по значениям БПК₅ и ХПК_{Cr}), биогены (соединения азота и фосфора) и ряд металлов. Природные фоновые концентрации перечисленных показателей были определены нами в данной работе.

Материалы и методы исследований

Материалом для расчетов послужили результаты срочных наблюдений продолжительностью 20 лет (с 1999 по 2018 г.). Расчет фоновых концентраций производился в соответствии с научно-обоснованными рекомендациями, предложенными ГХИ [Разработка..., 2016]. Данный метод основывается на построении динамических фазовых портретов, что весьма удобно, так как позволяет выявить характерные стационарные состояния той или иной системы, а также изменения, которые она претерпевает [Волькенштейн, 1978]. Ранее аналогичные расчеты производились нами для определения природных фоновых концентраций в р. Луге [Никерина, Задонская, 2020a] и р. Неве [Никерина, Задонская, 2020б].

Предварительным этапом обработки было исключение экстремально больших значений, так называемых выбросов, превышающих среднее многолетнее $\pm 3\sigma$, где σ – среднее квадратическое отклонение [Груза, Рейтенбах, 1982]. Далее производился поиск показателей, половина и более значений которых не превышала предел обнаружения. В этом случае природная фоновая концентрация рассчитывалась как медиана выборки срочных измерений.

Для оставшихся показателей в случае отсутствия статистически значимого тренда выполнялось построение фазовых портретов по значениям годовых медианных концентраций. Если же тренд оценивался как значимый, то природная фоновая концентрация рассчитывалась как 10-й перцентиль общей выборки срочных измерений. Динамические фазовые портреты строились в координатах $C-dC/dt$, где C – медианная концентрация вещества за определенный год, а dC/dt – годовое приращение этой концентрации. Примеры фазовых портретов изменения содержания минерального фосфора можно видеть на рис., там же представлены соответствующие графики временного хода медианных концентраций.



Фазовые портреты и временной ход медианных концентраций минерального фосфора: а – в первом створе, б – во втором, в – в третьем

По рисунку видно, что во всех створах состояние системы стационарное, хоть и присутствуют некоторые отклонения (например, в 2010 г. в первом и третьем створах наблюдается резкое повышение концентрации), однако они не выводят систему из равновесия.

Следующим этапом была оценка наличия критических точек, которые являются отражением резкого изменения состояния системы. В случае обнаружения критической точки природная фоновая концентрация вещества рассчитывалась как 25-й перцентиль общей выборки со срочными наблюдениями.

Природные фоновые концентрации оставшихся веществ рассчитывались как медиана общей выборки срочных измерений с учетом асимметрии (в случае распределения отличного от нормального рассматривали доверительный эллипс при $p = 0,95$ и исключали выбросы, выходящие за его пределы).

Результаты и их обсуждение

Полученные нами результаты расчетов представлены в таблице, превышения ПДК отмечены жирным шрифтом. ПДК веществ соответствуют объектам рыбохозяйственного значения (ПДК_{рыбхоз}) [«Об утверждении...», 2016], за исключением ХПК, в случае которого приведено значение ПДК в объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_{хозпит}) [ГН 2.2.5.1315-03].

Значения фоновых концентраций веществ

Показатель	створ 1	створ 2	створ 3	ПДК
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	1,0 ³	1,0 ¹	1,0 ¹	2,1
ХПК _{Cr} , мгО/дм ³	20²	20²	22²	15
N (NH ₄ ⁺), мг/дм ³	0,01 ¹	0,01 ¹	0,01 ¹	0,4
N (NO ₂ ⁻), мг/дм ³	0,005 ¹	0,005 ¹	0,005 ¹	0,2
N (NO ₃ ⁻), мг/дм ³	0,01 ²	0,01 ²	0,01 ²	9
P (PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	0,007 ⁴	0,007 ⁴	0,007 ⁴	0,05
Fe _{общ} , мг/дм ³	0,020 ²	0,020 ²	0,070 ⁴	0,1
Cu, мкг/дм ³	1,0 ²	1,0 ²	1,9⁴	1
Mn, мкг/дм ³	2,4 ²	2,4 ³	2,4 ³	10
Zn, мкг/дм ³	4,0 ³	4,0 ³	1,0 ²	10

Примечания. ¹ – фоновые концентрации веществ, в выборке которых половина или более значений не превышала предел определения вещества, их значения равны медиане общей выборки – всего 26,6 % от всех показателей и створов; ² – фоновые концентрации веществ, в выборке которых присутствовал временной тренд, они рассчитывались как 10-й перцентиль общей выборки (без медианного сглаживания) – всего 40,0 %; ³ – фоновые концентрации веществ, в фазовых портретах которых присутствовали критические точки, они рассчитывались как 25-й перцентиль общей выборки – всего 16,7 %; ⁴ – фоновые концентрации оставшихся веществ, рассчитанные как медиана общей выборки без выбросов, дающих перекося асимметрии, – всего 16,7 %.

Полученные значения ХПК_{Cr} во всех створах превышают ПДК_{хозпит}, значение концентрации меди в третьем створе превышает ПДК_{рыбхоз}. Это объясняется геохимическими особенностями региона, а именно промывным водным режимом и распространением хвойной растительности, что обуславливает большое содержание трудноокисляемых органических соединений, а также высоким содержанием в воде меди, цинка и других тяжелых металлов, вымываемых из подстилающих пород.

По шести веществам и показателям, включая БПК₅, минеральные формы азота и фосфора и марганец, и в истоке, и в устье природные фоновые концентрации не изменялись. По трем веществам природные фоновые концентрации в замыкающем створе были выше, чем в двух других, причем по железу общему и меди – значительно. Учитывая, что створы 2 и 3 находятся достаточно близко друг от друга и на участке между ними нет притоков, увеличение концентраций в нижнем створе скорее всего связано с поступлением загрязнения от Нарвской ГЭС, которая расположена между ними. По цинку в нижнем створе получены более низкие природные фоновые концентрации: это связано с тем, что ряд данных в этом створе имеет значимый тренд и природная концентрация рассчитывалась как 10-й перцентиль. В вышележащих створах трендов обнаружено не было, и определение природной концентрации происходило с помощью фазовых портретов и в итоге как 25-й перцентиль общей выборки. В данном случае более надежной рекомендуется считать природную концентрацию цинка 1,0 мкг/дм³ во всех трех створах.

Список литературы

- Волькенштейн М. В. Общая биофизика. М.: Наука, 1978. 592 с.
- ГН 2.2.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.
- Груза Г. В., Рейтенбах Р. Г. Статистика и анализ гидрометеорологических данных. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 216 с.
- Никерина Н. В., Задонская О. В. Изменение природных фоновых концентраций по длине реки Луга // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020» [Электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2020а. Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2020/index.htm
- Никерина Н. В., Задонская О. В. Применение метода динамических фазовых портретов для оценки природных фоновых концентраций в реке Нева: сб. докл. Междунар. науч. конф. «Четвертые Виноградовские чтения. Грани гидрологии». Санкт-Петербург, 20–27 марта 2020 г., 6 [в печати].
- Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 12 октября 2018 г.). Приказ Минсельхоз РФ от 13.12.16 № 552.
- Разработка научно-обоснованных рекомендаций по расчету фоновых концентраций химических веществ в речных водах России с учетом специфики природно-территориальных комплексов, а также антропогенного воздействия // Отчет о НИР по этапу 2 договора № 63-НИР/ФЦП-2016 от 18.04.2016. Рук. Л. И. Минина. ФГБУ «ГХИ», Ростов-на-Дону, 2016. 179 с.

ESTIMATION OF NATURAL BACKGROUND CONCENTRATIONS IN THE NARVA RIVER SOURCE AND MOUTH

N. Nikerina^{1,2}, O. Zadonskaya¹

¹ State Hydrological Institute, St. Petersburg

² St. Petersburg State University, St. Petersburg

Natural background concentrations of organic substances (according to BOD₅ and COD_{Cr}), nutrients (nitrogen and mineral phosphorus compounds) and some metals were calculated at three gauge stations of the transboundary Narva River, which marks the border with Estonia. The upper gauge station is near the source of the river (Stepanovshchina Village, 16 km from the outflow from Lake Peipus), and the two lower ones are near the mouth (0.65 km above and 4.8 km below the Narva Hydroelectric Power Plant situated 17 km away from the mouth). The detected COD_{Cr} concentrations exceed the established standard (maximum permissible concentration for household drinking water), and the natural concentration of copper in the third section exceeds the maximum permissible concentration for fishery waters. No obvious tendency for a spatial change in natural background concentrations was detected.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДЫ ОЗЕРА СЕМЕНОВСКОГО (ГОРОД МУРМАНСК) В 2019 г.

М. А. Постевая^{1,2}, З. И. Слуковский^{1,3}, В. А. Даувальтер¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты

² Мурманский арктический государственный университет, Мурманск

³ Институт геологии КарНЦ РАН,

ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

Представлены результаты анализа химических показателей городского оз. Семеновского. Вода в озере низкоминерализованная, относится к хлоридному классу, натриевой группе II типа. В озере наблюдаются значительные превышения фоновых концентраций по содержанию Fe, Mn, Zn, Ni, Sr и Cu. Водоем характеризуется как эвтрофный, испытывающий значительное антропогенное воздействие.

Озера являются неотъемлемым элементом городского ландшафта, испытывающим разностороннее антропогенное воздействие. Отсутствие достаточной проточности водоемов в условиях города вызывает их обмеление, увеличение массы донных отложений, мусора и интенсивное зарастание. Поведение и миграционная способность элементов и соединений в высоких широтах специфичны в силу климатических и ландшафтно-географических особенностей, а их токсичные свойства проявляются более активно в низкоминерализованных и низкотемпературных водах вследствие низкой скорости массоэнергообмена и более бедного видового разнообразия водных экосистем Субарктики [Моисеенко, 1997].

Оз. Семеновское располагается в Ленинском округе, в северной части г. Мурманска (рис. 1). Озеро имеет ледниковое происхождение, на расстоянии 400 м к западу от озера расположен геологический памятник природы «Бараний лоб у озера Семеновского». Площадь водоема составляет 0,213 км², максимальная глубина – 11 м.

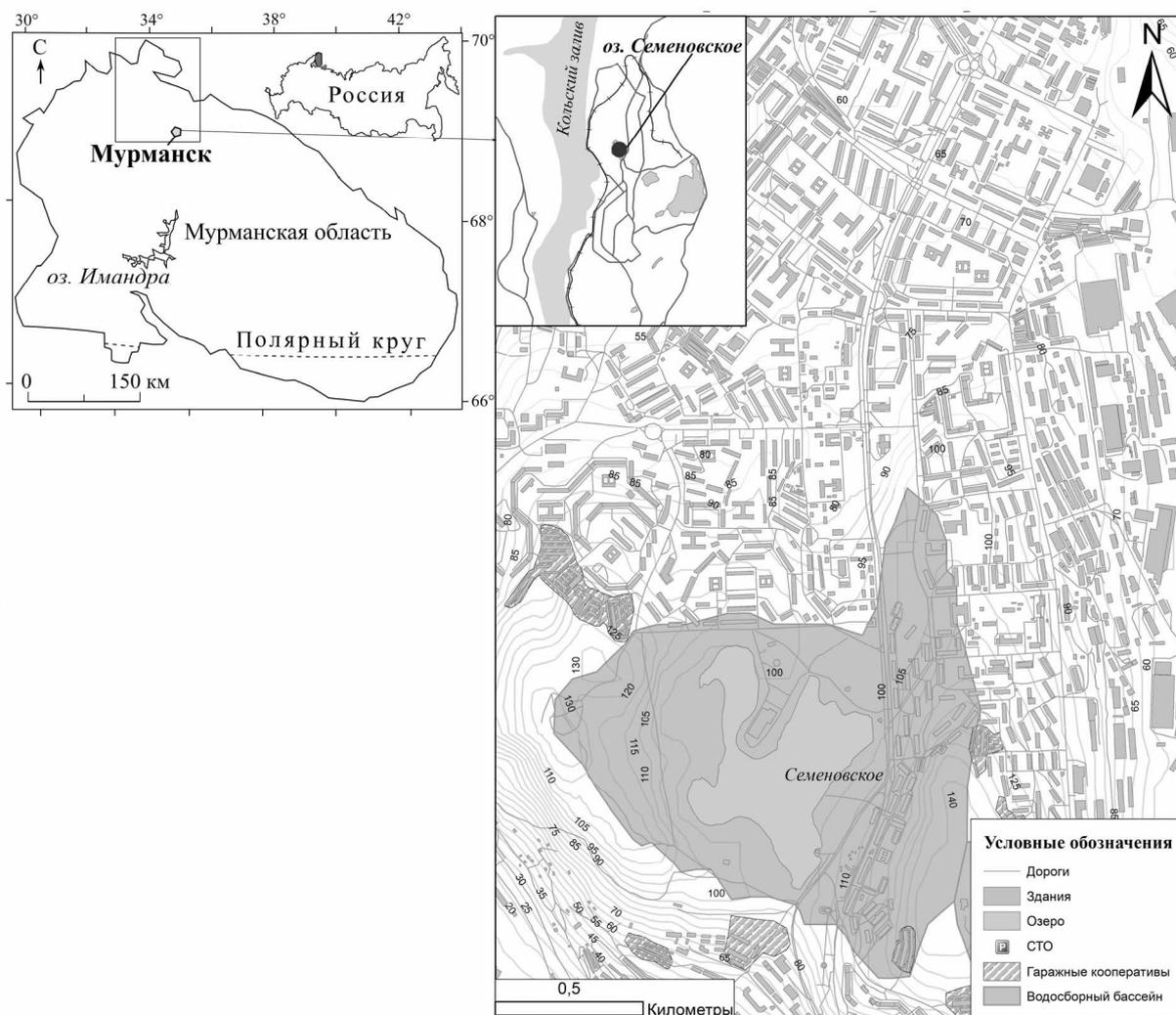


Рис. 1. Карта расположения оз. Семеновского

Водоем испытывает высокое антропогенное воздействие от автотранспорта (выхлопные газы, поверхностный сток тяжелых металлов и биогенных элементов с дорожного покрытия и прилегающих территорий), жилищно-коммунального хозяйства (сбрасывание грязного снега на поверхность озера), из-за несанкционированных сбросов сточных вод местного океанариума, выбросов ТЭЦ и других предприятий города. Также немаловажным фактором при оценке антропогенного воздействия на оз. Семеновское является его рекреационное значение. Зона отдыха горожан включает в себя парк аттракционов, велосипедно-пешеходные дорожки, детские площадки, кафе, набережную, лодочную станцию, «домик моржей». Все вышеперечисленное оказывает значительное влияние на геоэкологическое состояние водного объекта.

Объект и методы исследования

Пробы воды отбирались при помощи батометра из центральной части озера в поверхностных и придонных слоях водоема в полиэтиленовые бутылки объемом 1 литр. Аналитическая программа включала в себя измерения pH, электропроводности, щелочности, цветности, перманганатной окисляемости, главных ионов, азотной и фосфатной групп, тяжелых металлов. Определение данных показателей осуществлялось следующими методами: pH – потенциометрическим методом, со стеклянным электродом; электропроводность при 20 °С – кондуктометрическим методом; щелочность (Alk) – потенциометрическим титрованием по методу Грана; цветность – спектрофотометрическим методом, по хром-кобальтовой шкале цветности при двух длинах волн 340 нм и 400 нм; перманганатная окисляемость – титриметрическим методом; кальций, магний, калий, натрий – методом пламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии (спектрофотометр Р-Е 360); сульфаты и хлориды – методом жидкостной хроматографии (жидкостный хроматограф Waters HPLS с кондуктометрическим детектором Waters 432); сумма нитратов и нитритов – восстановление нитратов до нитритов пропусканием через колонку с омедненным кадмием и спектрофотометрическое определение азотсоединения; азот общий (TN) – окисление персульфатом калия в щелочной среде до нитратов, восстановление нитратов в нитриты кадмием, спектрофотометрическое определение азотсоединения; аммоний – спектрофотометрическое определение в виде индофенолового синего; фосфаты – спектрофотометрическое определение фосфорно-молибденового комплекса с использованием в качестве восстановителя аскорбиновой кислоты; фосфор общий (TP) – разложение персульфатом калия в кислой среде, спектрофотометрическое определение голубого фосфорно-молибденового комплекса; кремний – спектрофотометрическое определение в виде синего восстановленного кремнемолибденового комплекса; концентрации микроэлементов (Al, Fe, Cu, Ni, Co, Zn, Mn, Sr, Cr) определялись на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICP-MS. В качестве фоновых значений были использованы усредненные концентрации гидрохимических параметров озер западной части Мурманской области [Kachulin et al., 2017].

Результаты и их обсуждение

Воды оз. Семеновского характеризуются как ультрапресные, нейтральные (pH = 6,88). В период исследований показатель минерализации изменялся в пределах от 0,044 до 0,068 г/л. Озера с низкой минерализацией типичны для районов с избыточным увлажнением. Согласно классификации О. А. Алекина, по преобладающему аниону вода озера относится к хлоридному классу, по преобладающему катиону – к натриевой группе, по соотношению между главными ионами минерализации (мкг-экв/л) ко II типу: $\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$. Значительное преобладание ионов Na^+ и Cl^- в химическом составе водоема определяется влиянием морских аэрозолей Кольского залива [Моисеенко, Гашкина, 2011].

Максимальное содержание биогенных элементов (NH_4^+ , NO_3^- , TN, PO_4^{3-} , TP, Si) приходится на весенний период (рис. 2). Наибольшая концентрация азота аммонийного аккумулировалась в придонных слоях водоема и составила 639 мкгN/л. Присутствие в незагрязненных поверхностных

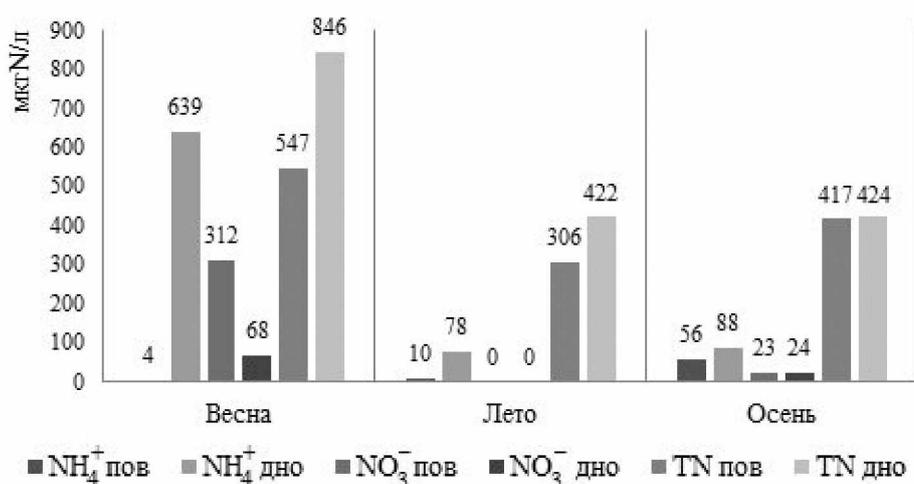


Рис. 2. Динамика изменений концентраций азотсодержащих соединений в оз. Семеновском за 2019 г.

водах ионов аммония связано, главным образом, с процессами биохимического разложения белковых веществ, мочевины, дезаминирования аминокислот. Естественными источниками аммиака служат прижизненные выделения гидробионтов. Кроме того, ионы аммония могут образовываться в результате анаэробных процессов восстановления нитратов и нитритов [Ступникова, 2019]. Нитраты же концентрировались в основном на поверхности озера, их количество не превышало 312 мкгN/л. Нитраты поступают в водоем с поверхностными и грунтовыми стоками и образуются при нитрификации аммонийных ионов в аэробных условиях под действием нитрифицирующих бактерий. Летом растворимые формы азота потребляются фитопланктоном и денитрифицирующими бактериями и их содержание в воде снижается. Содержание Si в период наблюдений изменялось в пределах от 0,11 до 0,71 мг/л. В озере наблюдается низкое содержание органических веществ. Перманганатная окисляемость составляла в среднем 4,05 мгО/л. Показатель цветности воды был в пределах 11–17 градусов.

По содержанию общего фосфора (TP) (TP < 10 мкг/л – олиготрофные, TP 10–35 мкг/л – мезотрофные, TP 35–100 мкг/л – эвтрофные, TP > 100 мкг/л – гипертрофные), а также по соотношению общего азота к общему фосфору оз. Семеновское характеризуется как эвтрофный водоем, испытывающий значительное антропогенное воздействие.

Среди микроэлементов, превышающих значения ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, отмечены только Fe и Mn. Данные соединения относятся к элементам, которые чувствительно реагируют на физико-химические изменения водной среды (рН, Eh, жизнедеятельность живых организмов). Поэтому их концентрации в поверхностных водах колеблются в очень широких пределах. Повышенные концентрации соединений Fe и Mn были зафиксированы на глубине 8–9 м центральной акватории озера (3339 мкг/л и 389 мкг/л, соответственно). Это может быть связано с тем, что после окисления и осаждения данных элементов на дно водоема они переходят в восстановленную растворимую форму и могут снова диффундировать в водную массу, что приводит к вторичному загрязнению [Горленко, 1977]. В поверхностных слоях водоема содержание Fe и Mn не превышало значений ПДК. Максимальное превышение концентраций по данным элементам отмечалось в весенний период, когда в питании поверхностных вод большую роль играют талые воды с прилегающих территорий. Летом содержание Fe и Mn снижается, однако их уровень превышает фоновые значения региона в 2,7 и 8,9 раза, соответственно.

Также отмечено довольно значительное превышение фоновых концентраций по следующим элементам: Zn > 30 раз, Ni > 9 раз, Sr в 5 раз и Cu > 2 раз (таб.).

Содержание микроэлементов (по средним величинам)
в воде оз. Семеновского в 2019 г.

Показатели мкг/л	Семеновское озеро	Фоновые значения
Al	14,6	62
Fe	658	105
Cu	1,7	0,7
Ni	5,6	0,6
Co	0,2	0,2
Zn	51,7	1,7
Mn	83,5	6,4
Sr	70,6	14
Cr	0,2	0,2

Сезонная динамика показала, что максимальные значения Ni (8,9 мкг/л) в придонных слоях и Zn (19 мкг/л) на поверхности озера наблюдались в апреле, до схода льда. Превышение фоновых концентраций Zn и Ni в оз. Семеновском может быть связано с их выходом из донных отложений [Гузева и др., 2019]. Вероятной причиной накопления данных элементов в озере является деятельность Мурманской ТЭЦ, использующей в качестве топлива мазут. Поскольку выбросы предприятий теплоэнергетической промышленности содержат такие токсичные соединения, как ванадий, свинец, цинк, ртуть (I класс опасности), никель, медь (II класс опасности), и могут распространяться на достаточно значительные расстояния при осаждении золы из атмосферы [Черенцова, 2013], влияние ТЭЦ на качество воды оз. Семеновского выглядит вполне логичным. Концентрация остальных ионов практически одинакова по всей водной толще.

Таким образом, сравнение гидрохимических показателей с фоновыми значениями свидетельствует о значительном влиянии городской среды на состояние оз. Семеновского.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10007).

Список литературы

- Алекин О. А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1970. 443 с.
- Горленко В. М., Дубинина Г. А., Кузнецов С. И.* Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977. 289 с.
- Гузева А. В., Слуковский З. И., Денисов Д. Б., Черепанов А. А., Даувальтер В. А.* Подвижные формы тяжелых металлов в донных осадках озер города Мурманска // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10, № 6(1). С. 70–77.
- Моисеенко Т. И.* Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1997. 261 с.
- Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А.* Зональные особенности закисления озер // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 1. С. 39–55.
- Слуковский З. И., Денисов Д. Б., Черепанов А. А.* Первые результаты обследования озер, расположенных в черте г. Мурманска (июль 2018 г.) // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. С. 288–291.
- Ступникова Н. А.* Экологический статус озера Култучное и его устойчивость к эвтрофированию // Актуальные проблемы природопользования и природообустройства: сб. ст. II междунар. науч.-практ. конф. Пенза: РИО ПГАУ, 2019. С. 68–79.
- Черенцова А. А.* Накопление поллютантов в почвенном покрове в зоне влияния золоотвала Хабаровской ТЭЦ-3 // Вестн. Красноярского государственного аграрного университета. 2013. № 6 (81). С. 80–88.
- Kashulin N. A., Dauvalter V. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I., Terentjev P. M., Kashulin A. N.* Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region, Russia // Journal of Environmental Science and Health. Part A. 2017. 52(9). P. 921–929.

SEASONAL VARIATIONS OF CHEMICAL PARAMETERS IN LAKE SEMENOVSKOYE (CITY OF MURMANSK) IN 2019

M. Postevaya^{1,2}, Z. Slukovskii^{1,3}, V. Dauvalter¹

¹ *Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre RAS, Apatity*

² *Murmansk Arctic State University, Murmansk*

³ *Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk*

The results of the analysis of hydrochemical indicators in urban Lake Semenovskoye are presented. The water in the lake has low TDS content, belongs to the chloride class, sodium group of type II. In the lake, background concentrations are significantly exceeded for Fe, Mn, Zn, Ni, Sr, and Cu. The lake is eutrophic, exposed to heavy human impact.

СНЕГ КАК ИНДИКАТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОЕМОВ НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА СЕМЕНОВСКОГО (ГОРОД МУРМАНСК)

М. М. Проскуракова¹, З. И. Слуковский^{2,3}, И. Р. Елизарова²

¹ *МБОУ «Гимназия № 2», Мурманск*

² *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты*

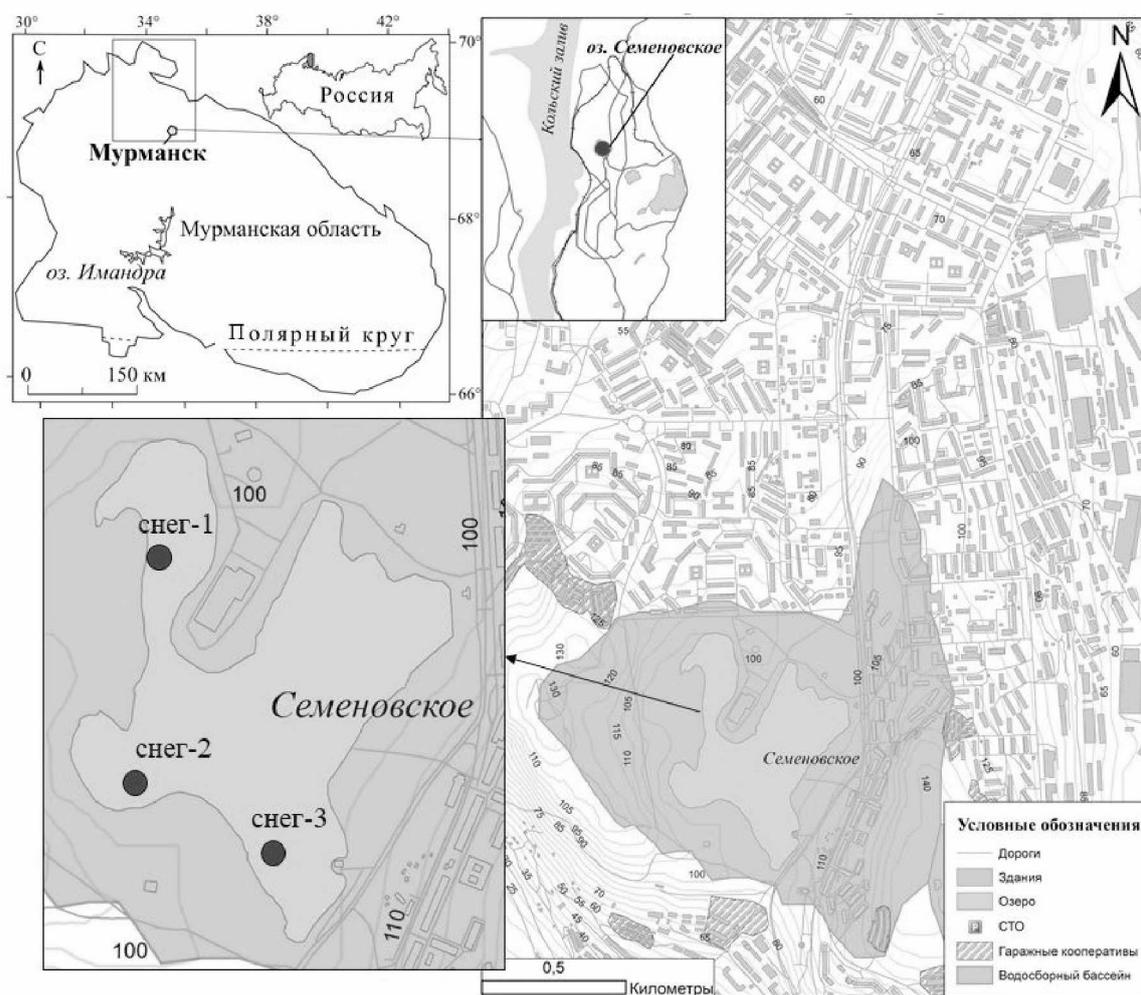
³ *Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

Проведено исследование состояния снежного покрова на территории оз. Семеновского, расположенного в Ленинском административном округе г. Мурманска. В ходе работы был определен характер загрязнения снежного покрова. При проведении аналитических работ основной акцент

был сделан на анализе содержания тяжелых металлов. Проведено сравнение результатов с ПДК для водоемов культурно-бытового значения, определены превышения и выявлены возможные источники загрязнения городского озера и территории вокруг него.

Особый интерес при геоэкологическом исследовании территорий представляют водоемы урбанизированных районов. Они, как правило, подвержены сильному антропогенному воздействию. Это формирует напряженную экологическую обстановку не только в самом водном объекте, но и на прилегающей территории, поэтому оценка экологического состояния водных объектов является актуальной [Сает и др., 1990].

Одним из важнейших водных объектов г. Мурманска является оз. Семеновское (рис.), вокруг данного водоема размещается рекреационная зона. Ежегодно ее посещают тысячи туристов и горожан, которые купаются и ловят в озере рыбу. Нельзя отрицать, что экосистема озера не находится в состоянии экологического риска. В непосредственной близости располагаются промышленные площадки ОАО «Мурманский Морской Торговый Порт» (1,59 км от водоема), предприятие, занимающееся погрузкой и выгрузкой угля, и ПАО «Мурманская ТЭЦ» (3,83 км), использующая в качестве топлива мазут [Slukovskii et al., 2020].



Карта расположения объекта исследования

При исследовании урбанизированных поверхностных водоемов наибольшее внимание, главным образом, уделяется тяжелым металлам [Мур, Рамамурти, 1987]. Обусловлено это широким распространением данного вида загрязнения, а также тем, что его количественные показатели характеризуют преимущественно влияние хозяйственной деятельности человека в городских экосистемах.

Цель работы – выявить и оценить характер загрязнения оз. Семеновского на основе анализа содержания тяжелых металлов в снеговом покрове водоема.

Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран снег. Одним из его свойств является аккумуляция вредных веществ из атмосферы. В снеге фиксируются как частицы природного происхождения, так и техногенного, поступающие в окружающую среду в результате выбросов промышленных предприятий и других источников загрязнения.

Для того чтобы определить степень загрязнения оз. Семеновского, были взяты точечные пробы снега с целью оценки качества талой воды, поступающей в водоем после окончания зимы. Пробы были отобраны в обработанные бидистиллированной водой пластиковые пятилитровые канистры по периметру озера (рис. 1) и обозначены «Снег-1», «Снег-2» и «Снег-3», соответственно. В ходе подготовки рассматривался ГОСТ Р 51592-2000 Вода. Общие требования к отбору проб. Для определения характера химического загрязнения его индикаторами выступили V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sb, W, Pb. Выбор элементов обусловлен требованиями по контролю за качеством окружающей среды. Как правило, эти элементы входят в список важнейших показателей для оценки уровня загрязнения того или иного объекта природы.

Высота снежного покрова в момент отбора составляла 60 см. Было взято 3 керна снега на полную глубину снегомером 110 × 1000. Анализ содержания химических элементов в пробах снега выполнен при помощи масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000 (PerkinElmer, США) в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 (ИСО 17294-2:2003), который регламентирует проведение определений в различных водах и атмосферных осадках.

Результаты и их обсуждение

Данные, полученные в результате анализа точечных проб снега, вместе с нормативным значением представлены в табл. 1.

Так как значения ПДК для снега отсутствуют, то в исследовании для оценки его экологического состояния использовали ПДК для поверхностных водоемов культурно-бытового значения (табл. 1). Обнаружено превышение ПДК Fe и Mn в пробе Снег-2, превышения ПДК остальных элементов в пробах обнаружено не было.

Таблица 1. Результаты анализа проб снега и значения ПДК [ГН 2.1.5.1315-03], мкг/дм³

Элемент	Снег-1	Снег-2	Снег-3	Среднее значение	ПДК
V	59,39	47,69	90,19	65,76	100
Cr	0,43	0,45	0,61	0,50	500
Mn	5,98	124,95	6,65	45,86	100
Co	0,07	0,25	0,11	0,14	100
Ni	12,99	12,09	16,89	13,99	20
Cu	3,37	1,61	2,8	2,59	1000
Zn	10,65	8,75	13,95	11,12	1000
Mo	0,18	0,16	0,16	0,16	250
Cd	0,04	0,02	0,03	0,03	10
Sb	0,12	0,11	0,62	0,28	5
W	0,007	0,005	н/п	0,004	50
Pb	0,24	0,21	0,18	0,21	10

Примечание. н/п – ниже предела обнаружения прибора.

Сравнение средних значений концентраций элементов в снеге (табл. 2) с концентрациями тяжелых металлов в воде оз. Семеновского показало, что содержание всех элементов в исследованном снеге больше, чем в воде городского озера [Slukovskii et al., 2020]. Однако средние значения концентраций Zn, Ni, Cu, Mn, V в озерах Мурманской области оказались ниже, чем в исследованном снеге, при этом содержание Pb, Co, Mo, Sb, W, Cd в снеге меньше [Bazova, 2017].

В то же время сравнение полученных данных с концентрациями некоторых тяжелых металлов в снеге пригородного фоновых района в Республике Карелия, расположенного южнее Мурманской области, показало, что содержание Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, W в снеге оз. Семеновского ниже концентрации этих металлов в снеге Карелии, но содержание Co, Ni, Mo, Sb, Mn и V в снеге озера больше [Рыбаков и др., 2013].

Таблица 2. Концентрация элементов в исследованном снеге, в воде оз. Семеновского, озерах Мурманской области и в снеге д. Пиньгуба (контроль)

Элемент	Средние значения концентраций элементов в точечных пробах снега, мкг/дм ³	Средние значения концентраций элементов в воде оз. Семеновского, мкг/дм ³ [Slukovskii et al., 2020]	Средние значения концентраций элементов в озерах Мурманской обл., мкг/дм ³ [Bazova, 2017]	Контроль (фон), д. Пиньгуба, Карелия, мкг/дм ³ [Рыбаков и др., 2013]
Pb	0,21	н/п	0,47	0,54
Zn	11,12	2,47	1,66	38,6
Cd	0,032	н/п	0,36	0,04
Co	0,14	0,13	0,47	0,01
Ni	13,99	2,91	1,06	1,81
Cu	2,59	2,49	0,94	7,22
Mo	0,16	0,14	0,55	0,03
Cr	0,50	0,18	0,50	0,64
Sb	0,28	н/п	0,69	0,05
Mn	45,86	36,3	2,09	5,96
V	65,76	1,69	0,67	0,22
W	0,004	н/п	0,61	0,02

Примечание. н/п – ниже предела обнаружения прибора.

В исследованных пробах снега были обнаружены лантаноиды, относящиеся к группе редкоземельных элементов (табл. 3). В последние годы эти элементы нередко относят к агентам антропогенного влияния на водные экосистемы наряду с тяжелыми металлами и другими загрязнителями [Sojka et al., 2019]. Таким образом, наличие их в снеге оз. Семеновского также может иллюстрировать определенный уровень антропогенной нагрузки на городской водоем.

Таблица 3. Концентрации редкоземельных элементов в снеге оз. Семеновского, мкг/дм³

Элемент	Снег-1	Снег-2	Снег-3
La	0,0845	0,0785	0,0680
Ce	0,0705	0,0874	0,0870
Pr	0,0072	0,0118	0,0078
Nd	0,0258	0,0471	0,0281
Sm	0,0039	0,0060	0,0055
Eu	0,0021	0,0035	н/п
Gd	0,0038	0,0054	0,0033
Tb	0,0005	0,0006	0,0002
Dy	0,0028	0,0029	0,0006
Ho	0,0005	0,0007	0,0003
Er	0,0011	0,0015	0,0003
Tm	0,0001	0,0002	н/п
Yb	0,0006	0,0012	н/п
Lu	0,0001	0,0002	н/п

Примечание. н/п – ниже предела обнаружения прибора.

Повышенные концентрации V, Co, Ni и Mn в пробах снега указывают на значительную протяженность зон факела загрязнения при сжигании мазута. Ближайшим теплоэнергетическим предприятием является ПАО «Мурманская ТЭЦ» Центральная промплощадка, высота труб которой составляет 100 и 150 м. Согласно п. 4.2 СанПиН 2.2.1/2.1.1.984-00, зона влияния высоких источников антропогенных выбросов составляет 10–40 высот труб. Таким образом, оз. Семеновское подвержено воздействию мазутных котельных ТЭЦ, вносящих основной вклад в характер загрязнений, поступающих в зимний период со снежными осадками.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотруднице центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН М. Б. Мальшиевой за помощь в подготовке к анализу образцов снега.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10007).

Список литературы

- ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (взамен ГН 2.1.5.585а-96, ГН 2.1.5.689-98, СП 2.1.5.761-99, ГН 2.1.5.963а-00, ГН 2.1.5.1093-02).
- ГОСТ Р 51592-2000. Вода. Общие требования к отбору проб.
- ГОСТ Р 56219-2014 (ИСО 17294-2:2003). Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.
- Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 285 с.
- Рыбаков Д. С., Крутских Н. В., Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б. Слуковский З. И., Лазарева О. В., Кричевцова М. В. Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия. СПб.: Изд-во ООО «ЭлекСис», 2013. 130 с.
- Сагит Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- СанПиН 2.2.1/2.1.1.984-00. Проектирование, строительство, реконструкция и эксплуатация предприятий. Планировка и застройка населенных мест.
- Bazova M. M. Specifics of the elemental composition of waters in environments with operating mining and ore-processing plants in the Kola North // *Geochem. Int.* 2017. Vol. 55. P. 131–143.
- Slukovskii Z., Dauvalter V., Guzeva A., Denisov D., Cherepanov A., Siroezhko E. The Hydrochemistry and Recent Sediment Geochemistry of Small Lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia // *Water*. 2020. Vol. 12(1130).
- Sojka M., Siepak M., Pietrewicz K. Concentration of rare earth elements in surface water and bottom sediments in lake Wadag, Poland // *Journal of Elementology*. 2019. Vol. 24(1). P. 125–140.

SNOW AS AN INDICATOR OF SURFACE WATER POLLUTION: THE CASE OF LAKE SEMENOVSKOYE (MURMANSK)

M. Proskuriakova¹, Z. Slukovskii^{2, 3}, I. Elizarova²

¹ *Murmansk Gymnasium № 2, Murmansk*

² *Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center RAS, Apatity*

³ *Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk*

The snow cover was studied over Lake Semenovskoye, located in the Leninsky administrative district of the City of Murmansk. Characteristics of the snow cover pollution were determined. The research focused on the analysis of heavy metals. The results were compared with the MPC for waterbodies used for recreation and household purposes, concentrations in excess of MPC were determined and possible sources of pollution of the urban lake and the territory around it were revealed.

ОЦЕНКА ПРИРОДНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

А. А. Строков, А. Ю. Санин

Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Москва

В статье приведены результаты оценки поступления десяти металлов в воду Онежского озера в районах абразионного, абразионно-аккумулятивного и дельтового берега озера, проведенной в 2018–2019 гг. Подтверждено влияние твердого стока реки Водлы на химический состав воды озера. В районе Пухтинской бухты отмечается «сильная (тесная)» связь между содержанием Al в воде и донных отложениях. В районе Андомского берега отмечается «сильная (тесная)» корреляционная связь между содержанием Al, Cu и Pb в донных осадках и воде. Влияния береговых процессов на степень загрязненности донных отложений не подтвердилось.

Качество воды такого важного водоема, как Онежское озеро (Верхне-Свирское водохранилище), формируется под действием различных факторов природного и техногенного характера. Большое количество работ по определению техногенной нагрузки на водоем и распределению химических веществ в нем представлено в Карельском научном центре РАН [Экосистема..., 1990; Сабылина, 2006; Онежское..., 2010; Ladoga..., 2010; Тимакова и др., 2011; Крупнейшие..., 2015; Калинкина и др., 2019]. В настоящем исследовании авторы поставили цель оценить воздействие динамических процессов природного характера, происходящих на берегах озера, на качество вод водоема. За основу принята морфогенетическая типизация берегов озера, разработанная в 2014–2015 гг. сотруниками ФГБУ «ГОИН» [Игнатов и др., 2017].

Материалы и методы

Исследования проводились в осенний период в следующих районах Онежского озера:

- абразионно-аккумулятивный берег в районе Пухтинской бухты (СНТ «Сосновый Бор», Прионежский район Республики Карелия) (2018 г.);
- абразионный берег в районе Андомской горы (д. Гневашевская, Вытегорский район Вологодской области) (2018–2019 гг.);
- дельтовый берег в районе устья р. Водлы (Шальское Онего) (п. Шальский, Пудожский район Республики Карелия) (2019 г.).

В названных районах озера проводилось визуальное изучение динамических процессов на берегах, геоэкологическое обследование природной среды озера с отбором проб поверхностных вод, донных и берегоформирующих отложений. В каждом районе отбор проб проводился в трех-четырёх створах на двух вертикалях на суше и трех вертикалях в воде. Вертикали в воде характеризуют вероятность потенциального волнового воздействия: урез воды (глубины 0–0,1 м), зона волнового воздействия (ЗВВ) (глубины до 5 м), вне ЗВВ (глубины более 5 м).

В качестве приоритетных показателей загрязнения природной среды Онежского озера в ходе настоящего исследования были выбраны десять металлов, имеющих двойной генезис (поступление из природных и/или техногенных источников) или природное происхождение:

- двойного генезиса (железо общее ($Fe_{\text{общ}}$), марганец (Mn), алюминий (Al), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), хром (Cr), свинец (Pb));
- природного происхождения (кобальт (Co), кадмий (Cd)).

Происхождение металлов было установлено при анализе сбросов в бассейн Онежского озера от управляемых сосредоточенных (точечных) источников за период 2007–2016 гг. по данным [Государственный..., 2009–2019].

Пробы воды анализировались с применением метода атомно-абсорбционной спектроскопии с пламенной и электротермической атомизацией. Пробы донных и берегоформирующих отложений анализировались с применением метода рентгенофлуоресцентного анализа. При анализе содержания металлов в грунтах рассматривались их подвижные формы, которые могут переходить в водную среду, оказывая непосредственное влияние на качество воды озера. Подвижная форма извлекалась с помощью ацетатно-аммонийного буферного раствора с pH 4,8 (ААБ) при соотношении грунт:раствор 1:10.

Для оценки влияния береговых процессов на качество вод Онежского озера проведен корреляционный анализ с использованием стандартного набора статистических операций по расчету коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена программы STATISTICA v. 7.0.

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице приведены результаты определения содержания металлов в воде (поверхностный горизонт), донных и берегоформирующих отложениях Онежского озера. Следует отметить, что в районе Андомской горы пробы отбирались как в 2018 г., так и в 2019 г., на остальных участках – однократно.

Анализ содержания металлов в воде показал, что в районе абразионного берега (Андомская гора) концентрации металлов меньше, чем в районе абразионно-аккумулятивного берега (Пухтинская бухта) и дельтового берега (Шальское Онего). Влияние р. Водлы на химический состав прибрежной зоны озера очевидно, что подтверждается литературными данными [Крупнейшие..., 2015].

Распределение металлов в прибрежной зоне Онежского озера

Среда	Район	Концентрация металла									
		Cu	Zn	Fe	Mn	Pb	Ni	Al	Cr	Co	Cd
		Растворенная форма									
Вода (пов. гор.), мкг/л	Андома 2018	6,4	2,6	57,9	28,3	10,1	0,6	2,9	0,1	0,7	0,05
	Андома 2019	9,0	2,8	153,3	36,8	16,0	1,2	72,1	6,4	2,0	0,12
	Пухт. бухта	11,0	1,3	178,7	64,2	8,1	0,6	91,3	0,1	0,7	0,05
	Шал. Онего	14,0	3,9	636,8	142,7	12,2	1,1	340,7	0,3	2,0	0,12
	р. Водла	9,4	4,4	1499,6	132,5	13,6	0,9	280,2	0,1	2,0	0,12
		Подвижная форма									
Донные отл., мг/кг	Андома 2018	0,4	0,1	31,0	52,1	0,2	0,04	0,7	0,005	0,02	0,0012
	Андома 2019	0,7	0,1	30,1	56,2	0,3	0,04	1,1	0,005	0,02	0,0012
	Пухт. бухта	0,3	0,1	18,8	16,4	0,3	0,04	1,1	0,005	0,02	0,0012
	Шал. Онего	0,3	0,1	17,3	14,2	0,2	0,04	1,2	0,005	0,02	0,0012
	р. Водла	0,01	0,1	42,4	44,4	1,2	0,04	1,7	0,005	0,02	0,0012
Берег. отл., мг/кг	Андома 2018	2,4	1,1	33,5	37,7	1,9	0,04	1,7	0,005	0,02	0,0012
	Андома 2019	1,4	0,5	19,7	31,3	1,1	0,04	1,1	0,005	0,02	0,0012
	Пухт. бухта	1,6	0,4	30,9	15,3	2,1	0,04	0,4	0,005	0,02	0,0012
	Шал. Онего	1,3	0,2	41,3	7,6	0,8	0,04	0,3	0,005	0,02	0,0012

Анализ содержания металлов в донных отложениях показал, что в районе Андомской горы концентрации подвижных форм металлов (в особенности Cu, Fe и Mn) больше, чем в других районах озера. В р. Водле наблюдаются наиболее высокие концентрации металлов, однако в районе Шальского Онего их концентрации значительно уменьшаются.

Анализ содержания металлов в берегоформирующих отложениях показал примерно одинаковое распределение подвижных форм в разных районах озера с небольшими изменениями в том или ином месте. Так район Андомской горы выделяется по высокому содержанию Cu, Zn, Mn и Al; участок берега около Шальское Онего – Fe; Пухтинская бухта – Pb.

Результаты проведенного корреляционного анализа в 2018 г. показали наличие разных типов связей между содержанием металлов в донных отложениях и воде (от «очень слабой» до «средней»), которые являются статистически незначимыми. Отдельное внимание стоит уделить содержанию Al в донных осадках и воде в районе Пухтинской бухты. Здесь отмечается «сильная (тесная)» связь (коэффициенты корреляции не менее 0,7), что с высокой долей вероятности указывает на поступление данного металла из донных отложений в воду.

Результаты 2019 г. показали наличие разных типов связей между содержанием металлов в донных отложениях и воде (от «очень слабой» до «сильной»), которые являются статистически незначимыми. Стоит выделить район Андомского берега, где отмечается «сильная (тесная)» связь (значение коэффициента корреляции не менее 0,7) между содержанием Al, Cu и Pb в донных осадках и воде. Этот факт с высокой долей вероятности указывает на поступление данных металлов из донных отложений в воду.

Оценка потенциального влияния береговых процессов на содержание металлов в донных осадках озера показала разные корреляционные связи (от «очень слабой» до «средней»), однако статистически незначимые. Следовательно, по результатам проведенных наблюдений не подтвердилось влияние береговых процессов на степень загрязненности донных отложений.

Заключение

Для такого крупного водоема, как Онежское озеро, среди природных источников поступления металлов наибольшую роль играет твердый сток рек (в частности, исследование это показало на примере р. Водлы в Восточном Прионежье). Однако на отдельных участках ведущую роль играют абразионные процессы, особенно для акватории, смежной с абразионными берегами, и для участков берега, характеризующихся отсутствием крупных притоков. Для конкретного металла интенсивность его поступления с твердым стоком рек или в ходе абразионных процессов определяется его содержанием в берегоформирующих породах и склонностью к миграции.

В целом результаты, полученные для 2018 и 2019 гг., оказались достаточно схожими. Участок около устья р. Водлы принципиально отличается от двух остальных, так как для него хорошо

проявляется влияние твердого стока реки – основного источника поступления загрязняющих веществ. Для Андомской горы и Пухтинской бухты впадающие реки оказывают лишь косвенное воздействие на концентрации тяжелых металлов, с их стоком они поступают, главным образом, на смежных участках берега. Непосредственно в точки отбора проб могут переноситься только озерными течениями. Ведущую роль здесь играют абразия и размывы берегов. Для большинства металлов их концентрации около устья р. Водлы больше, что подтверждает ведущую роль твердого стока рек в поступлении веществ природного происхождения.

Проверка достоверности корреляционных зависимостей требует проведения дополнительных исследований с расширением сетки опробования и сезонности отбора проб воды и грунта.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-35-00545 «Оценка воздействия береговых процессов на экологическое состояние Онежского озера».

Список литературы

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 г. Петрозаводск, 2009–2019.

Игнатов Е. И., Борщенко Е. В., Загоскин А. Л., Землянов И. В., Санин А. Ю., Терский П. Н., Фатхи М. О. Связь геологического строения побережья, истории развития рельефа и динамики берегов Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология. 2017. № 3. С. 65–78.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х г. // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2019. № 1. С. 62–72.

Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Сабылина А. В. Современный гидрохимический режим озера // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск, 2006. С. 58–108.

Тимакова Т. М., Сабылина А. В., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденции ее изменения за последние десятилетия // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 42–49.

Экосистема Онежского озера и тенденция его изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с.

Ladoga and Onego – Great European lakes: Observations and Modeling / Ed. L. Rukhovets, N. Filatov. Springer, 2010. 302 p.

ASSESSMENT OF THE NATURAL COMPONENT OF LAKE ONEGO WATER QUALITY

A. Strokov, A. Sanin

N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Moscow

The article presents the results of the 2018–2019 assessment of the input of 10 metals to the water of Lake Onego in areas with abrasive, abrasive-accumulative and delta shores. The influence of solid load from the Vodla River on the hydrochemical composition of the lake has been confirmed. In Pukhta Bay area, a strong (close) correlation is observed between Al content in water and in bottom sediments. Strong correlation between the content of Al, Cu and Pb in bottom sediments and water was found in the Andoma shore area. The effect of processes on the shore on the sediment pollution level has not been confirmed.

СУЛЬФАТРЕДУКЦИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СИСТЕМЫ ОЗЕР ЮГА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

К. В. Титова, Н. М. Кокрятская, Т. А. Жибарева

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. акад. Н. П. Лаверова РАН, Архангельск

В донных отложениях трех гидрографически связанных озер Глубокое, Белое и Назаровское Коношского района Архангельской области было изучено протекание сульфатредукции. Накопление и распределение соединений восстановленной серы в них в основном обусловлено поступлением сульфатов с подземными водами в разных количествах.

Круговорот серы как в пространстве, так и во времени сильно влияет на многие биогеохимические процессы [Holmer, Storkholm, 2001], а следовательно, и на внутриводоемные изменения, даже при низких концентрациях сульфатов в пресных озерах. Наличие H_2S в придонных слоях водного объекта обычно служит показателем присутствия большого количества органического вещества (ОВ), признаком острого дефицита кислорода и наличия заморных явлений [РД 52.24.450-2010]. Образование сероводорода, за исключением процессов гниения, является результатом протекания сульфатредукции, в основе которой лежит окислительно-восстановительная реакция окисления органических веществ в анаэробных условиях сульфатредуцирующими бактериями за счет сопряженного восстановления сульфатов [Иванов, 1979]. Изучение данного процесса в донных осадках возможно по распределению соединений восстановленной серы, которые являются производными соединениями образующегося сероводорода [Волков, 1984].

Целью настоящей работы являлось изучение процесса сульфатредукции в донных отложениях в зимний период еще двух озер системы – Назаровского и Глубокое (рис. 1) и сравнение полученных результатов для трех водоемов.

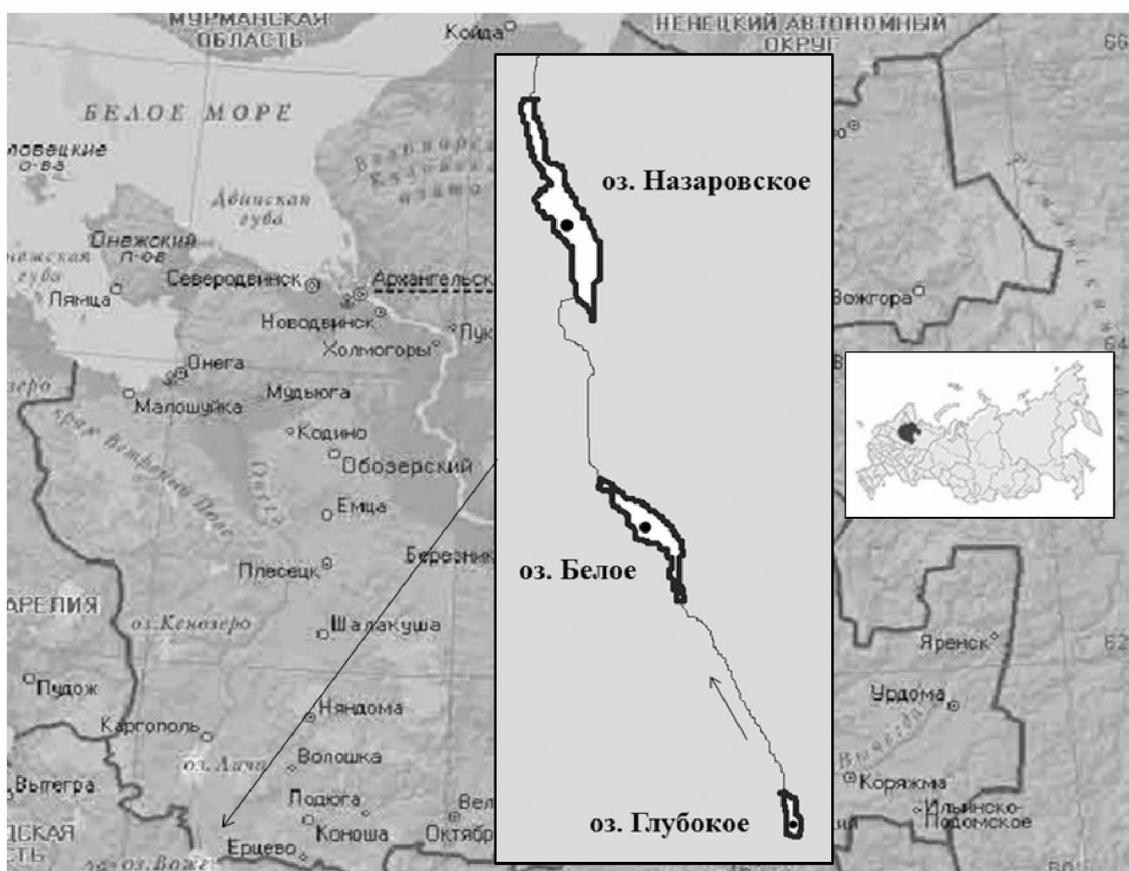


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования

В ходе ранее проведенных исследований малых озер Архангельской области для оз. Белого (среднего из цепи предполагаемых к рассмотрению в данной работе) нами выявлен тот факт, что сульфатредукция протекает с наибольшим накоплением соединений восстановленной серы как в воде, так и в донных отложениях (ДО) (почти в 10 раз больше по сравнению с другими изученными нами водоемами Архангельской области). В толще отложений соединений восстановленной серы накапливается в 4–5 раз больше, чем в поверхностных слоях [Титова и др., 2017а, б].

Натурный материал был получен при проведении экспедиций в Коношском районе в марте 2009 и 2010 гг. Образцы донных осадков отобраны в соответствии с установленными требованиями [ГОСТ..., 1980] ударной грунтовой трубкой с дискретностью 5 см. Определение содержания форм серы в донных отложениях проводилось по методике [Волков, Жабина, 1980], а количества органического углерода – на С,N,N-анализаторе фирмы «Hewlett-Packard».

Коношский район расположен в юго-западной части Архангельской области, входит в подзону средней тайги. Район характеризуется избыточным увлажнением. Подстилающие породы на данной территории представлены карбонатными породами, в частности известняками [Атлас..., 1976].

Территория района из-за особенностей рельефа является водоразделом трех больших рек – Северной Двины, Онеги и Кубены. Исследуемая группа озер относится к водосборному бассейну р. Онеги (верхнему ее течению), бассейн Белого моря. Водоемы изучаемой группы относятся к мелководным (максимальная глубина озер: оз. Глубокое – 5,5 м; оз. Белое – 2,9 м; оз. Назаровское – 5,0 м, на этих участках были отобраны пробы ДО); по площади водного зеркала – к категории малых, для них характерна вытянутая форма.

Подземные воды на данной территории в основном представлены водами гидрокарбонатного типа кальциевой группы [Подземные..., 1968]. Однако в ряде случаев для изучаемого района отмечено наличие среди водовмещающих пород гипсов, доломитов, ангидритов. С поступлением подземных вод с повышенным содержанием сульфатов в грунты оз. Белого мы связывали выявленные особенности протекания сульфатредукции в этом водоеме [Титова и др., 2017а].

Отобранные отложения всех исследуемых озер представляли собой илистые осадки черного или темно-коричневого цвета влажностью от 63 до 99 %. Наименьшее содержание влаги отмечено для ДО оз. Глубокое (табл.).

Характеристика отобранных донных отложений

Озеро	Год отбора	Мощность, см	Влажность, %	$C_{орг}$, %
Глубокое	2009	47	69–96	7,79–10,52
	2010	40	63–95	8,35–15,16
Белое	2009	23	82–99	12,28–19,60
	2010	49	82–93	8,11–23,27
Назаровское	2009	37	83–91	13,98–20,31
	2010	44	79–93	11,47–19,40

Данный водоем также отличался среди озер группы с наименьшим количеством органического вещества в расчете на органический углерод ($C_{орг}$) (в среднем 10,07 %), а наибольшее – выявлено в осадках оз. Белого (14,18 %) (табл. 1). Отметим, в целом содержание $C_{орг}$ в донных осадках исследуемых водоемов выше, чем для больших озер России: Байкал – (0,09–5 %) [Выхристюк, 1980], Онежское – 1,7 %, Ладожское – 1,4 % [Намсараев, Земская, 2000]) и сопоставимы или немного меньше количества его в ДО малых озер урбанизированных ландшафтов Литвы (10–31 %) [Кревш и др., 2006]. В распределении органического углерода только для оз. Белого отмечена тенденция к уменьшению содержания от поверхности в толщу отложений, для двух остальных – закономерностей не выявлено.

Среднее содержание и изменение концентраций сульфатов в ДО отражают следующую тенденцию: оз. Глубокое (0,09 (0,01–0,76)%) < оз. Назаровское (0,59 (0,02–2,03)%) < оз. Белое (2,71 (0,50–7,00)%). Для озер Белого и Глубокое наибольшие количества сульфатов обнаружены в первый год исследования, а для оз. Назаровского – во второй. В толще отложений всех трех озер сульфаты обнаруживались в заметных количествах, независимо от их содержания на поверхности, % (верхний горизонт → толща отложений): Глубокое (0,75 → 0,19; 0,05 → 0,10); Белое (7,00 → 0,65; 1,68 → 1,51); Назаровское (0,75 → 0,43; 0,02 → 0,51).

В среднем суммарное содержание соединений восстановленной серы в ДО оз. Глубокого составляло 0,32 (0,11 – 1,66)%, оз. Белого – 2,05 (0,31 – 11,70)%, оз. Назаровского – 1,40 (0,14–3,15)% (рис. 2).

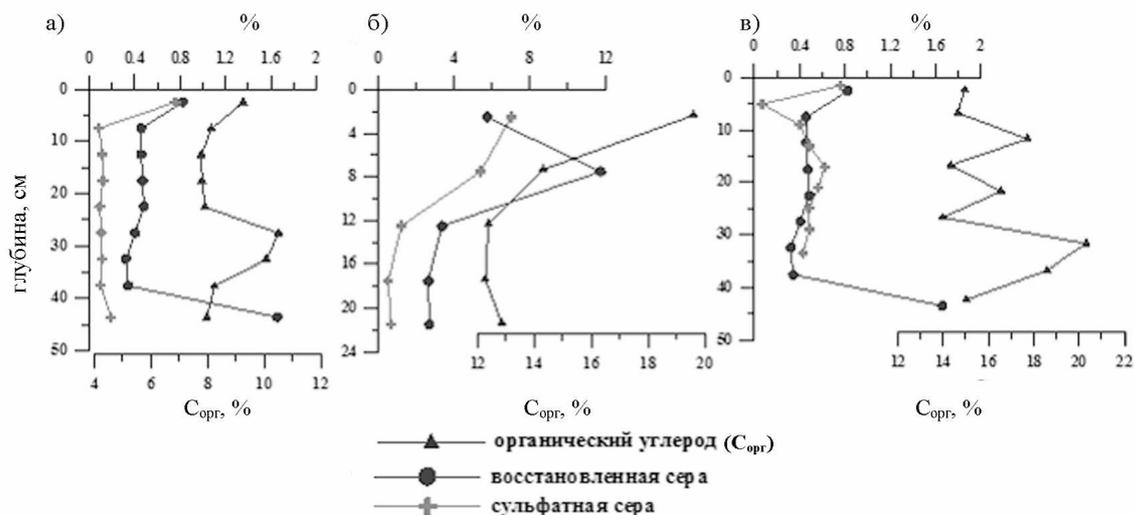


Рис. 2. Распределение параметров в ДО озера: а) Глубокого, б) Белого, в) Назаровского

Среди форм восстановленной серы доминирующими для всех озер были органическая и пиритная сера. В толще ДО оз. Глубокого органическая преобладала во всех отобранных образцах, оз. Назаровского – в большинстве случаев. В оз. Белом в поверхностных слоях осадков также содержалось наибольшее количество восстановленной серы в составе органических соединений, но уже в толще ДО доминирующей становится пиритная сера (до 81 % среди всех форм), что является особенностью этого водоема.

Таким образом, при изучении сульфатредукции в донных отложениях трех близкорасположенных и связанных в систему озер Коношского района Архангельской области в марте 2009 и 2010 гг. мы получили следующие результаты:

- содержание органического вещества в них различается, но ОВ достаточно, так как по результатам корреляционного анализа изменения количеств соединений восстановленной серы слабо зависят от изменения количеств $C_{орг}$;
- в оз. Глубоком (первом в системе) отмечалось минимальное содержание сульфатов и ОВ, это сопровождалось наименьшим образованием соединений восстановленной серы с накоплением ее в виде органической составляющей;
- среднее в системе наиболее мелкое оз. Белое характеризовалось наибольшим содержанием ОВ и серы сульфатов, что приводило к наиболее активному протеканию процесса, на что указывают как количество восстановленной серы в ДО, так и распределение форм в ее составе (доминирование пирита);
- оз. Назаровское, сопоставимое по глубине с оз. Глубоким, но отличавшееся от последнего бóльшими количествами сульфатов в ДО, содержало и чуть большее количество восстановленной серы. При этом доминирование органической составляющей отмечено только в случае, когда накопление восстановленной серы сопровождалось более низкими количествами серы сульфатов в ДО. Когда увеличение количеств соединений восстановленной серы соседствовало с заметным снижением сульфатов при большем их количестве в целом, тогда доминировала сера пирита.

Работа выполнена при поддержке научного проекта Минобрнауки РФ № АААА-А18-118012390167-1 и проекта РФФИ № 18-05-70087_Ресурсы Арктики.

Список литературы

- Атлас Архангельской области / Отв. ред. Н. А. Моргунова. М.: ГУГК, 1976. 72 с.
 Волков И. И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
 Волков И. И., Жабина Н. Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // Химический анализ морских осадков. М.: Наука, 1980. С. 5–27.

- Выхристюк Л. А.* Органическое вещество донных осадков Байкала. Новосибирск: Наука, 1980. 80 с.
- ГОСТ 17.1.5.01–80.* Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: Изд-во стандартов СССР, 1980. 5 с.
- Иванов М. В.* Геохимическая деятельность сульфатредуцирующих бактерий // *Химия океана. Геохимия донных осадков.* М.: Наука, 1979. Т. 2. С. 327–339.
- Кревиш А., Кучинскене Р., Пашкаускас А.* Микробиологическая деструкция органического вещества в донных осадках озер Литвы // *Микробиология.* 2006. Т. 75, № 2. С. 257–263.
- Намсараев Б. Б., Земская Т. И.* Микробиологические процессы круговорота углерода в донных осадках озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 160 с.
- Подземные воды СССР.* Обзор подземных вод Архангельской области. Том I. Гидрогеологический очерк. М., 1968. 421 с.
- РД 52.24.450–2010.* Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N'-диметил-п-фенилендиамином. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2010. 50 с.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А.* Процесс сульфатредукции в пресноводных озерах (Белое, Нижнее, Святое) Коношского района Архангельской области // *Вестн. МГОУ. Естественные науки.* 2017а. № 4. С. 123–134.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А.* Сульфатредукция в донных отложениях озера Белое (Архангельская область) // *Материалы XXII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии «Геология морей и океанов» (Москва, 20–24 ноября 2017 г.).* М., 2017б. Т. 4. С. 210–214.
- Holmer M., Storkholm P.* Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review // *Freshwater Biology.* 2001. Vol. 46, N 4. P. 431–451.

SULFATE REDUCTION IN BOTTOM SEDIMENTS IN THE SYSTEM OF LAKES IN SOUTHERN ARKHANGELSK REGION

K. Titova, N. Kokryatskaya, T. Zhibareva

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research RAS, Arkhangelsk

Sulfate reduction processes were studied in the bottom sediments of three hydrographically connected lakes Glubokoye, Belaye and Nazarovskoye (Konoshsky District, Arkhangelsk region). The accumulation and dispersal of reduced sulfur compounds in them is mainly due to the influx of various quantities of sulfates from groundwater.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЗЕР ДУНЧАН-ХУ И ДАМИНГ-ХУ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО КИТАЯ

Г. Т. Фрумин, Чэнь Цзиньлин, В. В. Дроздов

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Обобщены материалы и данные о показателях экологического состояния озер Дунчан-ху и Даминг-ху, расположенных в Северо-Восточном районе Китайской Народной Республики, в условиях высокой антропогенной нагрузки. Проанализированы данные о загрязнении донных отложений, водной массы, а также данные о развитии фитопланктона. Обоснован выбор методов комплексной геоэкологической оценки состояния озер, включая оценку их трофического статуса.

В Китайской Народной Республике (КНР) существует достаточно развитая нормативная и правовая база, направленная на сохранение водных ресурсов суши и защиту их от загрязнения. Среди них: закон о контроле за загрязнением воды, закон о воде КНР и «Ключевые положения политики в области охраны окружающей среды». «Закон о воде» содержит всесторонние

и конкретные положения об ответственности органов управления водными ресурсами за их истощение или загрязнение [Китайское..., 2016]. При этом с учетом развития промышленности и сельского хозяйства антропогенное воздействие на озерные экосистемы в ряде районов Северо-Востока КНР за последние 15–20 лет возрастает [Пан Сюйгуй и др., 2004; Чжу Юэнь, Ченг Цземин, 2004; Хуан Цинхуэй и др., 2006; Хуан Жэнь-Жэнь и др., 2010; Хуан Жэнь-Жэнь, Фруммин, 2011].

Озеро Даминг-ху расположено в центре города Цзинань, провинция Шаньдун, его площадь составляет 46 га, средняя глубина – около 2 м, а средняя емкость для хранения воды – 830 000 м³. Оно принадлежит к числу относительно небольших городских мелководных озер. На рис. 1 представлены схема оз. Даминг-ху и расположение станций мониторинга водных масс и донных отложений.

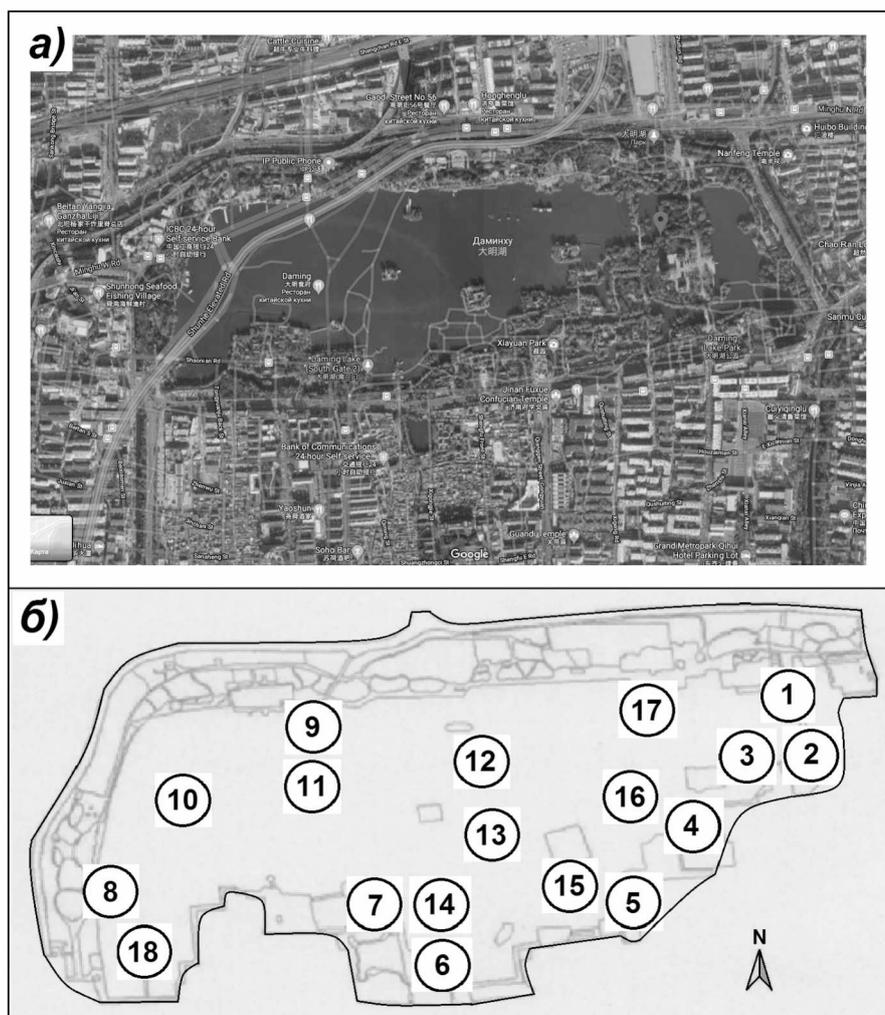


Рис. 1. Схема оз. Даминг-ху (по данным [Цюй Лин и др., 2005]):

а) общий вид озера; б) расположение станций мониторинга водных слоев и донных отложений

Установлено, что среднее содержание органического углерода (ТОС) и общего фосфора (ТР) в донных отложениях оз. Даминг-ху достигает 10,31 % и 1,76 мг/кг, соответственно. Содержание общего фосфора в донных отложениях в центральной части озера составляло 1,49–1,68 мг/кг, а в прибрежных районах – 1,61–2,84 мг/кг. Определены концентрации ряда токсичных тяжелых металлов (ТМ) в донных отложениях озера – свинца, меди, хрома и др. В целом содержание ТМ в донных отложениях оз. Даминг-ху наибольшее вдоль южного берега. Общий объем загрязненных донных отложений оценивается примерно $3,27 \times 10^5$ м³. На рис. 2 представлены графически особенности пространственного распределения загрязняющих веществ, обнаруженных на станциях мониторинга.

Выполнен также анализ содержания тяжелых металлов в тканях высших водных растений. На первом месте биоаккумуляции ТМ – свинец, далее – цинк и хром.

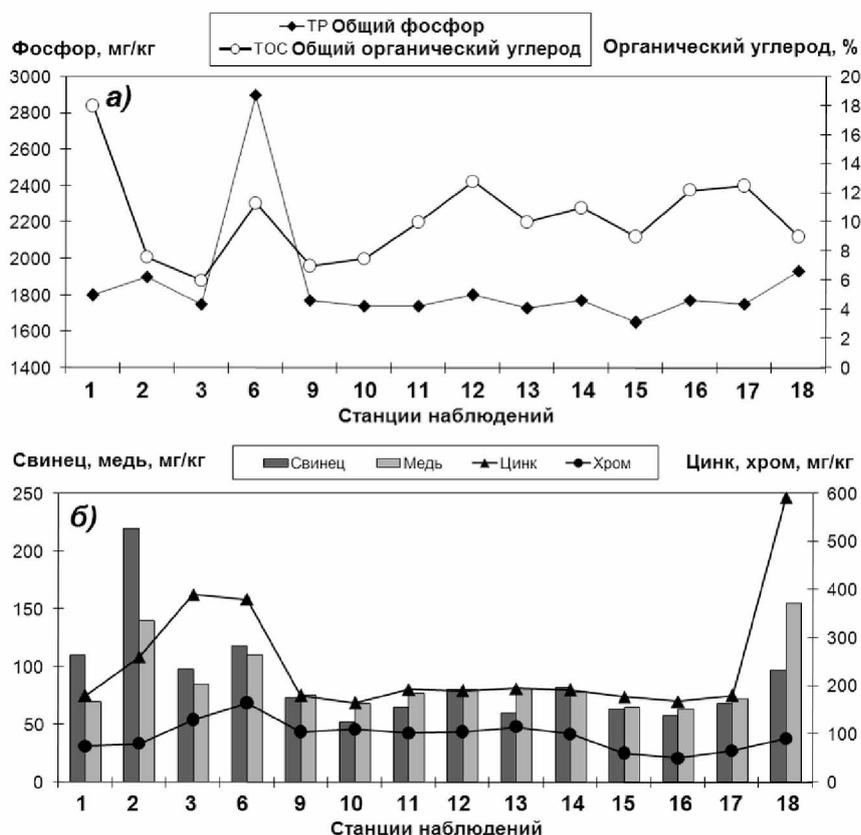


Рис. 2. Содержание загрязняющих веществ в донных отложениях оз. Даминг-ху (по данным [Ленг Цзяфэн, 2000; Цюй Лин, 2005]):

а) содержание фосфора и органического углерода; б) содержание металлов

Кроме того, в оз. Даминг-ху проводится ежемесячный мониторинг содержания в водных массах общего азота, общего фосфора, хлорофилла *a*, мутности, pH, температуры поверхностных вод и ряда других показателей. Данные о составе и степени загрязнения донных отложений, анализ биологических тканей, имитационные эксперименты позволили получить оценочные результаты об особенностях взаимодействия донных отложений и воды в озере, о трансформации и миграциях загрязняющих веществ. Выявлены особенности сезонной динамики гидрологических и гидрохимических показателей оз. Даминг-ху, а также основные источники загрязнения.

Озеро Дунчан расположено в районе Ляочэн провинции Шаньдун. Площадь акватории составляет 4,2 км². Данное озеро по сути является внутригородским, процесс урбанизации значительно повлиял на очертания его береговой линии и экологическое состояние. Гидрохимический режим и компоненты водного баланса озера находятся также в зависимости от динамики стока во впадающей в него Желтой реки. В связи с быстрым развитием экономики, общества и туризма в окружающем районе Ляочэн размер города продолжает увеличиваться. Вслед за этим возрастают и объемы промышленных сточных и бытовых сточных вод в данный водоем, что приводит в том числе к его эвтрофикации.

В 2009–2016 гг. содержание биогенных веществ в оз. Дунчан достигало следующих величин: общий азот был ниже класса V, общий фосфор был классифицирован как IV–V, ХПК была классифицирована как III–IV. Качество воды находится на стадии умеренной эвтрофикации. В то же время существуют определенные проблемы в управлении водной средой оз. Дунчан, такие, как «межфункциональные отделы управления», «неупорядоченное развитие и использование». Таким образом, проведение дальнейших систематических научных исследований на оз. Дунчан имеет большое значение для социально-экономического развития района Ляочэна.

Одной из главных проблем, влияющих на геоэкологическое состояние озер, является процесс их эвтрофикации. Проблема эвтрофикации озер широко распространена в КНР [Хуан Цинхуэй и др., 2006; Frumin, Khuan Zhan-Zhan, 2011]. Во многих районах страны в последние годы по мере ускорения процесса роста городов, существенно возросли объемы недостаточно очищенных сточных

промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых сточных вод. В результате ряд водотоков и водоемов испытывают значительное загрязнение применительно к водной массе, а также к донным грунтам [Пан Сюйгуй и др., 2004]. Наблюдается трансформация водных биоценозов. На этом фоне снижаются природные возможности водных экосистем к самоочищению.

Для оценки трофического статуса озер Даминг-ху и Дунчан-ху использован вероятностный подход, ранее разработанный ОЭРК (Организация экономического развития и кооперации), и базирующийся на данных о содержании фосфора общего, средней концентрации хлорофилла «а» и средней глубине видимости диска Секки. Для оценки уровня трофности были использованы пять градаций: $\mu_{УО}$ – вероятность ультраолиготрофного состояния, $\mu_{О}$ – вероятность олиготрофного состояния, $\mu_{М}$ – вероятность мезотрофного состояния, $\mu_{Э}$ – вероятность эвтрофного состояния и $\mu_{ГТ}$ – вероятность гипертрофного состояния. Кривые вероятностной классификации трофического статуса озер, разработанные ОЭРК, были аппроксимированы аналитическими зависимостями [Фрумин, Хуан, 2012]. Данный подход показал ранее свою высокую эффективность при исследовании оз. Тайху и других крупных озер КНР [Хуан Жань-Жань и др., 2010; Хуан Жань-Жань, Фрумин, 2011].

В целом полученные результаты оценки экологического состояния озер Даминг-ху и Дунчан-ху позволяют сделать выводы о наличии в основном умеренного загрязнения. Однако в ряде районов данных озер и в пределах их водосборов экологическая ситуация вызывает значительные опасения. Применяемые методы мониторинга и оценки трофического статуса озерных экосистем могут обеспечить научную основу для оптимизации управления экосистемами озер Северо-Восточного Китая и обеспечения экологической безопасности.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 19-05-00683а.

Список литературы

Китайское Государственное управление охраны окружающей среды. Экологический бюллетень Китая. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <http://www.sepa.gov.cn/plan/zkqb/2016/>.

Ленг Цзяфэн, Донг Цзе. Текущая ситуация загрязнения воды в озере Даминг-ху и контрмеры // Шаньдунская окружающая среда, 2000. № 3. С. 26–33.

Пан Сюйгуй, Цзян Сянхун, Ли Цзяньхуа и др. Геологические характеристики почв в районе Цзинань-Цзян. Геофизические и геохимические исследования, 2004. 256 с.

Фрумин Г. Т., Хуан Ж-Ж. Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов. Методическое пособие. СПб.: РГГМУ, 2012. 28 с.

Хуан Жань-Жань, Дроздов В. В., Фрумин Г. Т. Трофическое состояние экосистемы озера Тайху // Материалы Международного семинара «Геология, геоэкология, эволюционная география». СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2010. С. 138–141.

Хуан Жань-Жань, Фрумин Г. Т. Трофическое состояние пресноводных озер Китая // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 19. С. 14–20.

Хуан Цинхуэй, Ван Лэй, Ван Цзыцзянь. Прогресс исследований по трансформации видов фосфора и его потенциальному экологическому воздействию в озерах Китая // Lake Science. 2006. 18(3). С. 199–206.

Цюй Лин, Лю Липин, Ван Суфен. Анализ изменений качества водной среды до и после обработки озера Даминг-ху // Аньдунские водные ресурсы. 2005. № 4. С. 6–22.

Чжу Юэнь, Ченг Цземин. Исследование проекта ландшафтного нарушения водообмена в озере Даминг-ху // Журн. Технологического университета Тайюаня (издание Social Science). 2004. 22(3). С. 26–32.

Frumin G. T., Huan Zhan-Zhan. Trophic Status of Fresh-Water Lakes in China // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81, N 13. P. 2653–2657.

ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL STATUS OF LAKES DONCHANG AND DAMING UNDER ANTHROPOGENIC IMPACT FROM INDUSTRIAL AREAS OF NORTH-EAST CHINA

G. Frumin, Chen Jenlin, V. Drozdov

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

The materials and data on the environmental indicators of Lake Donchang and Daming, located in the North-East region of the People's Republic of China and exposed to high anthropogenic pressure, are summarized. Data on the pollution of sediments, water masses, as well as data on phytoplankton development were analyzed. The choice of methods for integrated geo-ecological assessment of the lakes, including assessment of their trophic status, is substantiated.

ГИДРОБИОЛОГИЯ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАТОМОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГОРОДСКИХ ОБЪЕКТОВ

С. И. Вокуева, Д. Б. Денисов

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты

Проведено исследование современного состояния экосистемы крупного арктического озера Имандра в пределах влияния городских объектов по сравнению с не испытывающей прямого воздействия частью водоема, с использованием диатомовых комплексов поверхностных донных отложений. Выявлены значительные трансформации экосистемы в районах городов Апатиты и Мончегорск, проявляющиеся в виде развития процессов эвтрофирования и загрязнения токсическими веществами, подтвержденные с помощью данных по геохимии водоема. Корреляционный и факторный анализы позволили выделить наиболее важные действующие факторы на состояние качества вод, а также определить некоторые виды диатомовых водорослей как самостоятельные индикаторы загрязненных вод.

Водоемы, расположенные в пределах урбанизированных районов, играют важную роль, зачастую используются для питьевого водоснабжения, рыбохозяйственных или рекреационных целей. В то же время они находятся под прямым антропогенным влиянием, в том числе воздействием промышленности. Так, озеро Имандра подвержено нагрузке от городов Апатиты и Мончегорск и их градообразующих предприятий (АНОФ и КГМК), но за счет своих размеров не испытывающие прямого влияния районы водоема могут использоваться для сравнения в качестве условно-фоновых. Для оценки состояния экосистемы в различных участках были использованы диатомовые комплексы (ДК) поверхностных донных отложений (ДО) озера, отражающие интегральные характеристики за последние годы (4–10 лет в условиях высоких широт), что позволяет проводить корректный сравнительный анализ качества вод, не зависящий от суточных и сезонных вариаций [Денисов и др., 2019].

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является озеро Имандра, крупнейший водоем Мурманской области. Материалом для анализа послужили ДК из поверхностных (0–1 см) слоев ДО различных участков акватории оз. Имандра. Всего были рассмотрены 22 станции (рис. 1, а). Отбор, обработка и анализ проб были осуществлены стандартными общепринятыми методами [Жузе и др., 1949; Давыдова, 1985] по схеме, используемой в ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН, описанной ранее [Методы..., 2019]. Для оценки качества среды на основе ДК определялись индексы сапробности (S), видового разнообразия Шеннона-Уивера (H') и обратного индекса Симпсона (1/D), интегральное значение pH [Моисеенко, Разумовский, 2009]. Коэффициент загрязнения ДО токсическими элементами (C_T) вычислялся по адаптированной для условий Европейской субарктики методике Хокансона [Даувальтер, 1999]. Выявление контролирующих развитие диатомовых комплексов факторов, а также различий в условиях формирования качества вод для разных участков водоема выполнялось на основе корреляционной матрицы с помощью метода главных компонент (РСА) в двухмерном факторном пространстве [Померанцев, 2008].

Результаты и их обсуждение

Исследование ДК поверхностных ДО оз. Имандра показало, что их состав достаточно сильно различается в отдельных участках акватории водоема, а именно в зонах непосредственного влияния городов Апатиты и Мончегорск и районах, не испытывающих прямого антропогенного воздействия (см. рис. 1, а). Для первых, охватывающих станции отбора проб со 2 по 13 (плес Большая Имандра (БолИ) и север Йокостровской Имандры (ЙИ)), характерен комплекс доминирующих видов, включающий таксоны *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cleve & Möller, *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen, *Stephanodiscus alpinus* Hust., *Cyclostephanos dubius* (Hust.) Round и *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen. А остальная часть водоема, состоящая из центральной и западной части плеса ЙИ и Бабинской Имандры (БИ), характеризуется кардинально иным составом доминантов: *Pantocsekiella comensis* (Grun.) K. T. Kiss & E. Ács, *Aulacoseira alpigena* (Grun.) Kramm., *Pantocsekiella rossii* (H. Nâk.) K. T. Kiss & E. Ács, *Pantocsekiella schumannii* (Grun.) K. T. Kiss & E. Ács и *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm. Большинство обнаруженных диатомовых водорослей для всего озера являются типичными пресноводными и планктонными видами. Кроме того, для южной части зоны прямого антропогенного влияния вычисленные по ДК индексы видового разнообразия Шеннона – Уивера (H') и полидоминантности ($1/D$) принимают одни из наименьших для всего водоема значения, что указывает на доминирование единственного вида либо нескольких, но численности которых во много раз превышают численности остальных, что обусловлено процессами эвтрофирования вод в этом районе.

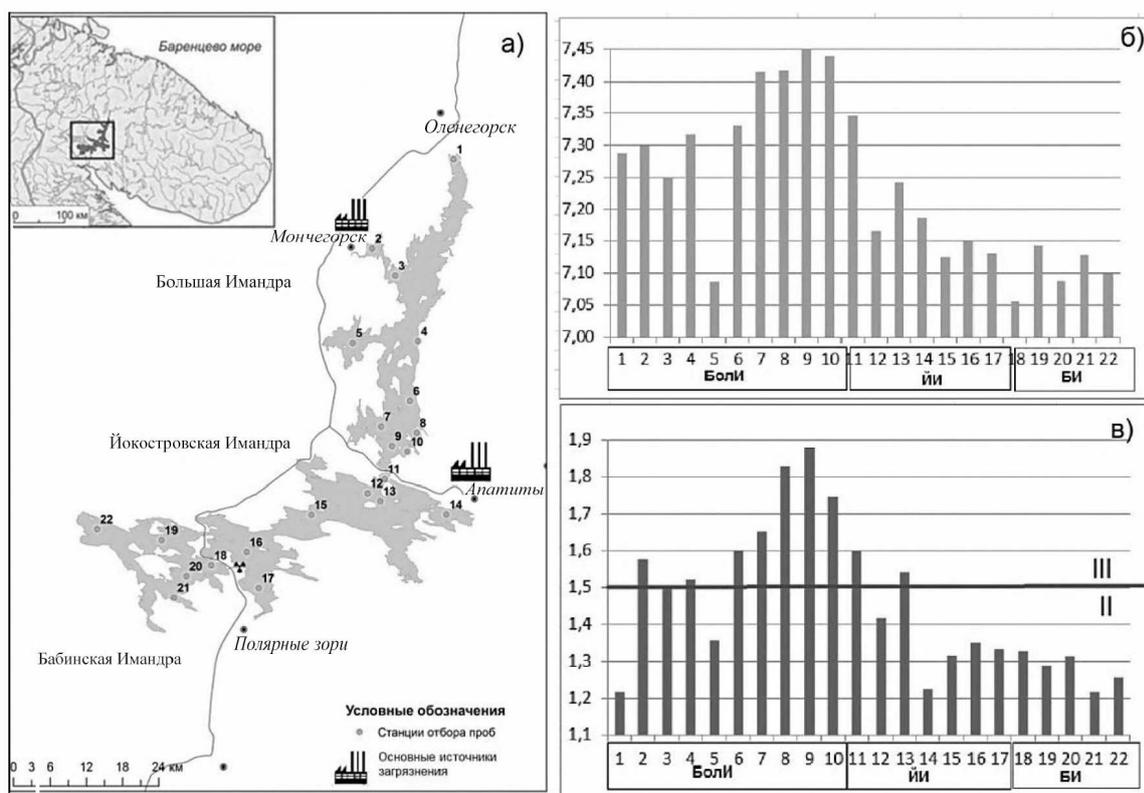


Рис. 1. а) карта-схема оз. Имандра и расположение станций отбора проб и основных источников загрязнения; б) значения вычисленного по ДК водородного показателя pH по станциям отбора проб; в) значения индекса сапробности (БолИ – Большая Имандра, ЙИ – Йокостровская Имандра, БИ – Бабинская Имандра)

Степень антропогенной трансформации водоема оценивалась также на основе пространственного распределения вычисленных значений pH и индекса сапробности (рис. 1, б, в). Данные показатели отразили очень схожую картину: в области, подверженной индустриальному влиянию, наблюдаются наибольшие значения pH и S, а для индекса сапробности они превысили пограничное значение (1,5) между чистыми водами и умеренно загрязненными, II и III классами качества, соответственно [ГОСТ 17.1.3.07-82, 1983], отмеченное на (см. рис. 1, в) линии. Максимальные

показатели (7,4–7,5 для рН и 1,8–1,9 для S) зафиксированы в районе губы Белая и зоне транзита из нее (ст. 8, 9), куда происходит прямое поступление щелочных, обогащенных биогенными элементами сточных вод предприятий апатитовой промышленности и городов Апатиты и Кировск. Данные выводы были подтверждены с помощью гидрохимических данных, включающих содержания химических элементов в воде и ДО, в том числе посредством корреляционного анализа.

Использование содержаний элементов в ДО позволило вычислить степени загрязнения ДО токсическими веществами за индустриальный период, распределение которых вновь указывает на БолИ и север ЙИ как на наиболее загрязненные районы, и чрезвычайно сильно это проявляется в губе Монче (ст. 2) (рис. 2, а). Здесь поступление металлов, в особенности меди и никеля, происходит в огромных масштабах от Кольской ГМК в г. Мончегорск, сбрасывающей в озеро сточные воды медно-никелевого производства. Совместно с отмеченными ранее достаточно высокими значениями водородного показателя и индекса сапробности (см. рис. 1, б, в) и большими содержаниями поступающих биогенных элементов может быть сделан вывод о значительной антропогенной трансформации этого района акватории. В то же время за счет максимальных содержаний некоторых химических элементов в районе губы Монче и высокой степени загрязнения было выявлено угнетающее действие токсических веществ на некоторые виды-доминанты, распространенные в плесе БолИ, что уменьшило значение индекса сапробности сравнительно с губой Белая и южной частью плеса в целом.

Подтвердило разницу между характером поступающих загрязнений в районах городов Мончегорск и Апатиты использование факторного анализа на основе метода главных компонент, учитывающего все данные о содержании диатомей, рассчитанных показателях, концентрациях элементов в воде и ДО, а также гидрохимических показателях (рис. 2, б). Его анализ позволил сделать вывод о том, что основной фактор описывает трофическую нагрузку (отрицательные значения равны максимальным нагрузкам), а второй фактор характеризует в том числе токсическую нагрузку. Здесь в отдельную от остальной части акватории группу выделились станции БолИ и северной части ЙИ, с наибольшими отрицательными связями с основным фактором, причем обособленное положение заняла губа Монче, для которой максимальными оказались влияния обоих факторов, и трофического, и токсического.

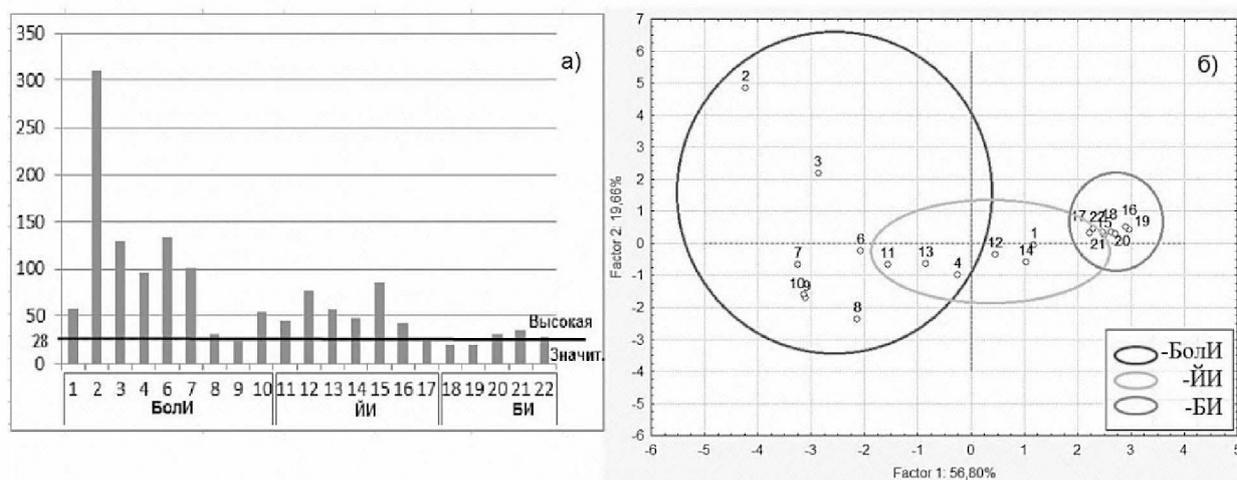


Рис. 2. а) значения степеней загрязнения ДО токсическими веществами; б) отображение станций отбора проб в пространстве двух главных факторов

Кроме того, на основе описанных выше корреляционного и факторного анализов для оз. Имандра были выделены индикаторные виды, являющиеся показателями антропогенной трансформации экосистемы, наблюдаемые в максимальных количествах в зоне влияния городских территорий (рис. 3). Ими оказались такие виды, как *Aulacoseira granulata*, *A. islandica*, *Cyclostephanos dubius* (см. рис. 3, а), *Stephanodiscus alpinus*, *S. minutulus* (см. рис. 3, б) и *S. neoastraea*. Как отдельный показатель токсической нагрузки были приняты разновидности *Stephanodiscus*, наблюдающиеся в минимальных количествах в районе губы Монче и характеризующиеся положительными корреляционными связями только с показателями эвтрофирования, в то время

как для остальных индикаторных видов корреляция наблюдается и с показателями токсичности, в том числе содержанием тяжелых металлов.

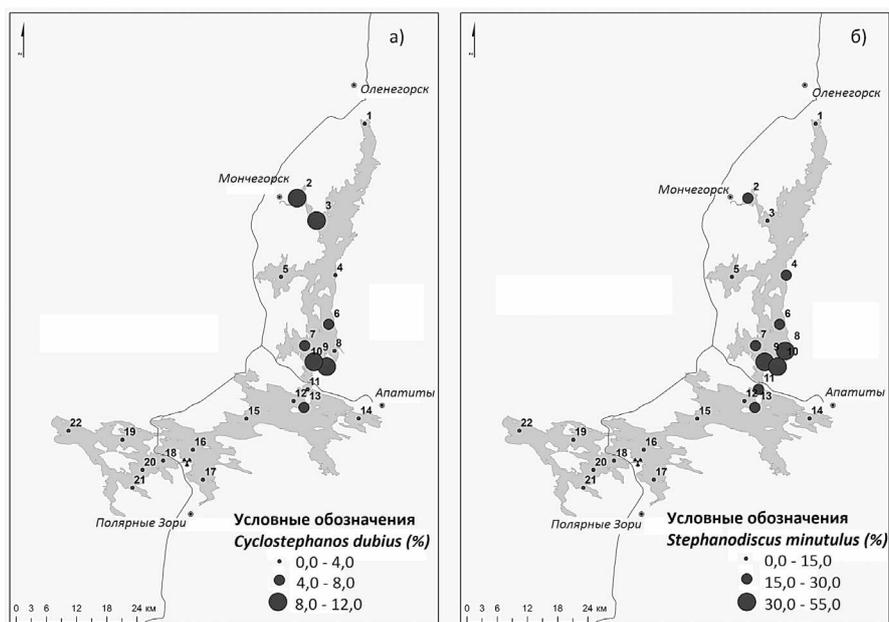


Рис. 3. Относительная численность (%) видов-индикаторов загрязненных вод

Заключение

Анализ диатомовых комплексов поверхностных ДО оз. Имандра позволил сделать вывод о значительной трансформации водной экосистемы в пределах зоны влияния урбанизированных территорий, включающих города Мончегорск и Апатиты, в частности предприятий цветной металлургии и апатитовой промышленности. С помощью рассчитанных по ДК показателей совместно с геохимическими данными были выявлены в этих районах, соответствующих зонам южной части плеса Большая Имандра, северной части Йокостровской Имандры и губы Монче, интенсивные процессы эвтрофирования, а также последствия токсической нагрузки конкретно для губы Монче. Эти процессы сопровождаются низкими показателями таксономического разнообразия, высокими индексами сапробности и значениями рН в сравнении с остальной частью оз. Имандра, принятой в качестве условно-фоновой. Кроме того, для перечисленных районов с помощью факторного и корреляционного анализов были выделены конкретные виды-индикаторы антропогенного загрязнения, рекомендованные по результатам исследования к использованию в целях регионального мониторинга качества вод озер, в особенности крупных.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2015-0001; интерпретация результатов загрязнения донных отложений поддержана грантом РФФ № 19-77-10007.

Список литературы

- ГОСТ 17.1.3.07-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. М.: Гос. ком. СССР по стандартам, 1983.
- Давыдова Н. Н. Диатомовые водоросли – индикаторы экологических условий водоемов в голоцене / Н. Н. Давыдова. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Даувальтер В. А. Закономерности осадконакопления в водных объектах европейской Субарктики (природоохранные аспекты проблемы): дис. ... докт. геогр. наук. Апатиты, 1999. 398 с.
- Денисов Д. Б., Косова А. Л., Вокуева С. И. Перспективные направления биоиндикации качества пресных вод в Арктике // Труды XVI Ферсмановской научной сессии. 2019. № 19. С. 146–150.
- Жузе А. П., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова В. С. Диатомовый анализ. Кн. 1. Л.: Гос. изд-во геологической литературы, 1949. 239 с.
- Методы экологических исследований водоемов Арктики. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2019. 180 с.
- Моисеенко Т. И., Разумовский Л. В. Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озерах (диатомовый анализ) // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427, № 1. С. 132–135.
- Померанцев А. Л. Метод Главных Компонент (РСА). 2008. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://rcs.chemometrics.ru/old/Tutorials/pca.htm>.

USING DIATOM ASSEMBLAGES IN SEDIMENTS TO ASSESS THE STATE OF AQUATIC ECOSYSTEMS IN THE URBAN IMPACT ZONE

S. Vokueva, D. Denisov

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center RAS, Apatity

The current state of the ecosystem of a large Arctic Lake Imandra under urban impact was studied in comparison with the part of the lake not directly exposed, using diatom assemblages in top-core sediments. Significant transformations of the ecosystem were detected near the towns of Apatity and Monchegorsk, which were manifest in the development of eutrophication processes and toxic pollution. This was proved using geochemical data. Using correlation and factor analysis we managed to determine the most important factors affecting the water quality, and to identify some diatom species as independent indicators of polluted waters.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ РЕКИ ПАЗ ПО ГИДРОБОТАНИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Н. В. Зуева¹, О. Г. Гришуткин², Ю. А. Зуев³, Д. Ю. Ефимов², А. А. Бобров²

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург*

² *Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, Борок*

³ *Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО», Санкт-Петербург*

Выполнена оценка состояния озерно-речной системы реки Паз по характеристикам растительного покрова. Исследовано 27 ключевых участков реки (станций) в полевой сезон 2019 г. Продемонстрированы относительно высокое разнообразие водных макрофитов и степень зарастания реки. Выявлен индикаторный комплекс видов, характерный для олиго- и олигомезотрофных условий. Экологическое состояние исследованного участка системы реки Паз по гидробиотическим показателям признано относительно благополучным.

Река Паз (Пасвик, Патсо-йоки) – трансграничная река Кольского полуострова. Ее русло проходит по территории трех государств: Финляндии, России и Норвегии. Экосистема реки находится под значительным антропогенным воздействием. Так, на качество воды влияют выбросы и сбросы металлургического производства – комбината Печенганикель, коммунальные стоки и т.д. [Moiseenko et al., 1994; Сандимиров, 2012]. Водный режим реки регулируется гидроэлектростанциями, которых на водотоке 7 [Барабанова, 2019]. Поэтому состояние р. Паз вызывает пристальное внимание всех трех государств. Цель настоящего исследования – оценка экологического состояния р. Паз с помощью характеристик ее растительного покрова.

В работе использованы материалы собственных полевых работ коллектива в 2019 г. Исследованный участок р. Паз начинается от предплотинной зоны ГЭС Кайтакоски и продолжается вниз по течению до оз. Сальминярви (рис.). Всего исследовано 27 станций водотока. Используются традиционные методические разработки [Катанская, 1981; Бобров, Чеме-рис, 2006].

Для исследованного участка реки выявлены высокое видовое богатство и разнообразие макрофитов, стабильный флористический состав. Число видов растений, обнаруженных на станциях реки, в среднем составляет около 8, изменяясь в диапазоне 1–17. Средний индекс разнообразия Шеннона для изученной области равен 2,4 бита (от 0 до 3,5).

В целом зарастание можно охарактеризовать как прибрежное, прибрежное-фрагментарное, очень редко – сплошное. Общее проективное покрытие станций реки в среднем невысоко (10 %). Однако, как и в случае с видовым богатством, диапазон его изменений весьма широк. Эти две характеристики демонстрируют умеренную связь своих величин, коэффициент корреляции между

ними составляет 0,51. Такая картина говорит о том, что хотя с увеличением площади зарастания и увеличивается число обнаруженных на станции видов, но есть участки, где большие заросли сформированы лишь несколькими видами макрофитов.



Схема исследованного участка реки и станции полевых работ

Часть станций отличается более высокой степенью зарастания (20 % и выше), богатством и разнообразием флористического состава. В этом случае можно говорить о наличии благоприятных условий, которые определяют значительное развитие водных растений, несвойственное для северных рек.

Для реки характерен комплекс видов-индикаторов олиго- и олигомезотрофных условий. В его ядро входят *Sparganium angustifolium* и *Subularia aquatica*, встречающиеся на 80 % станций. Также в нем присутствуют виды макрофитов, встречаемость которых хоть и несколько ниже, но они отмечены практически на всех отрезках реки: *Ranunculus schmalhauseni*, *Isoetes echinospora*, *I. lacustris*.

Таким образом, для р. Паз характерны относительно высокое видовое богатство и разнообразие макрофитов, стабильный флористический состав. Случаи низких значений богатства и общего проективного покрытия макрофитов часто наблюдаются на участках с затопленным лесом, пнями и торфянистым субстратом. Тем не менее, несмотря на количественное снижение характеристик сообществ макрофитов, в составе флоры на таких станциях также присутствует комплекс видов-индикаторов олиго-, олигомезотрофии.

В целом зарастание озерно-речной системы р. Паз несколько повышенное из-за формирования плотинами гидроэлектростанций благоприятного гидрологического режима на части русла, а именно снижения скорости течения реки в зоне водохранилищ, формирования в таких местах, при замедлении скорости потока, подходящих для растений донных отложений. Оптимальен для растений и световой режим: малый процент затененных участков русла и высокая прозрачность воды. Умеренное содержание биогенных элементов поддерживает развитие растений в течение всего вегетационного периода. Кроме того, проявляется тепляющий эффект достаточно крупной долины реки.

Таким образом, экологическое состояние исследованного участка озерно-речной системы р. Паз, по материалам полевых исследований растительного покрова, признано относительно благополучным.

Работа выполнена в рамках договора № 15-06 «Оценка состояния водной растительности в долине реки Паз» с ПМООЭП «ЭкоЦентр».

Список литературы

- Барabanова Е. А. Водохранилища водосбора арктических морей России // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 2. С. 123–131.
- Бобров А. А., Чемерис Е. В. Изучение растительного покрова ручьев и рек: методика, приемы, сложности // Гидробиотаника 2005: Материалы VI Всерос. школы-конф. (пос. Борок, 11–16 окт. 2005 г.). Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2006. С. 181–203.
- Катанская В. М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения / Ред. И. М. Распопов. Л.: Наука, 1981. 187 с.
- Сандимиров С. С. Современное гидрохимическое состояние озерно-речной системы реки Пасвик (Кольский полуостров) // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 3(10). С. 88–98.
- Moiseenko T., Mjelde M., Brandrud T., Brettum P., Dauvalter V., Kagan L., Kashulin N., Kudriavtseva L., Lukin A., Sandimirov S., Traaen T. S., Vandysh O., Yakovlev V. Pasvik River Watercourse, Barents Region: Pollution Impacts and Ecological Responses. Investigations in 1993. Oslo: NIVA-report OR-3118, 1994. 87 p.

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE PAZ RIVER SYSTEM BY HYDROBOTANICAL INDICATORS

N. Zuyeva¹, O. Grishutkin², Yu. Zuyev³, D. Efimov², A. Bobrov²

¹ Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

² Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS, Borok

³ St. Petersburg Branch of VNIRO (GosNIORKH named after L. S. Berg), St. Petersburg

The state of the Paz lake-river system was assessed based on the characteristics of the plant cover. During the field season 2019, 27 key sites along the river were surveyed, revealing a relatively high diversity of aquatic macrophytes and the degree of overgrowing. The set of indicator-species for oligo- and oligomesotrophic conditions was identified. The ecological state of the studied part of the Paz river system was recognized to be relatively good.

АНТИОКСИДАНТНЫЙ СТАТУС КЛЕТОК ЖАБР МИДИЙ В УСЛОВИЯХ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ГИПОКСИИ

А. О. Лантушенко¹, Я. В. Мезер¹, Е. С. Кладченко², А. Ю. Андреева²

¹ Севастопольский государственный университет, Севастополь

² Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь

Исследовано влияние кратковременной глубокой гипоксии (24 ч) на общую антиоксидантную активность и смертность клеток жаберной ткани мидий, *Mytilus galloprovincialis*. Мидии – традиционный объект культивирования на крымском побережье Черного моря, который в силу особенностей своего ареала обитания зачастую сталкивается с периодами дефицита кислорода. Показано, что гипоксия индуцирует накопление активных форм кислорода в клетках жаберной ткани, а также приводит к росту доли мертвых клеток в суспензии до $22,5 \pm 2,6$ %.

Согласно прогнозам глобальное изменение климата приведет к снижению уровня растворенного кислорода и распространению зон кислородного минимума [Melzner et al., 2013]. Для марикультурного хозяйства наиболее существенным является формирование периодических или перманентных гипоксических зон в шельфовой континентальной зоне, поскольку она интенсивно используется для рыбного промысла и ведения аквакультурного хозяйства [Turner et al., 2012]. Вместе с тем шельфовые крупные виды гидробионтов, как правило, характеризуются низкой степенью устойчивости к дефициту кислорода. Гипоксия является одной из основных

причин гибели и возникновения различных физиологических нарушений у морских крупных видов гидробионтов (двустворчатых моллюсков и рыб), имеющих важное промысловое значение [Clark et al., 2013].

Черноморский регион характеризуется благоприятными условиями для аквакультурного выращивания двустворчатых моллюсков. Однако колебания концентрации растворенного кислорода в поверхностном слое воды (100 м), наличие термоклина, общая тенденция роста среднегодовой температуры воды [Репетин, 2012; Архипкин и др., 2013; Зацепин и др., 2017] могут приводить к возникновению локальных зон гипоксии. Последнее обуславливает актуальность исследования влияния дефицита кислорода на физиологическое состояние основных объектов культивирования черноморского региона – *Mytilus galloprovincialis*, *Ostrea edulis* и *Crassostrea gigas* (Яхонтова и др., 2008). Универсальными маркерами стресса для оценки физиологического состояния двустворчатых моллюсков являются показатели антиоксидантного комплекса жабр [Fernández et al., 2010].

Настоящая работа посвящена анализу влияния дефицита кислорода на общую антиоксидантную активность и смертность клеток жабр двустворчатого моллюска средиземноморской мидии (*Mytilus galloprovincialis*), являющегося объектом интенсивной региональной аквакультуры в Черноморском регионе.

Мидий (*Mytilus galloprovincialis*) (длина раковины $56,3 \pm 1,5$ мм, $12,7 \pm 2,1$ г, $n = 16$) помещали в емкость с морской водой, продуваемой газообразным азотом до концентрации кислорода 0,3 мг/л. Спустя 24 часа у мидий отбирали фрагмент жаберной ткани, механически измельчали в морской воде и фильтровали от крупных агрегатов. Клетки отмывали в морской воде путем центрифугирования (350 г в течение 5 мин). Для оценки способности клеток к продукции активных форм кислорода готовую суспензию разводили стерильной морской водой ($1-2 \cdot 10^6$ клеток на мл) и окрашивали красителем DCF-DA в течение 30 мин в темноте, после чего анализировали интенсивность флуоресценции на проточном цитометре Beckman Coulter FC 500 в зеленом канале флуоресценции (FL1). Доля мертвых клеток определялась по флуоресценции красителя Propidium iodide (Sigma Aldrich) спустя 40 мин инкубации клеток в темноте. Анализ данных проводили в программе Flowing Software 5,2. Достоверность различий между выборками оценивали при помощи U-критерия Манна – Уитни.

Согласно распределению по прямому и боковому рассеянию (что соответствует условному размеру и гранулярности), клетки жаберной ткани представляли собой один морфологический тип, внутри которого, однако, наблюдался разброс по однородности внутреннего содержимого клеток, что проявлялось в вытянутости облака по оси ординат (рис. 1). В контрольных образцах (нормальное содержание кислорода) доля мертвых клеток в суспензии не превышала 2,5 %, что укладывается в границы нормы и объясняется особенностями пробоподготовки.

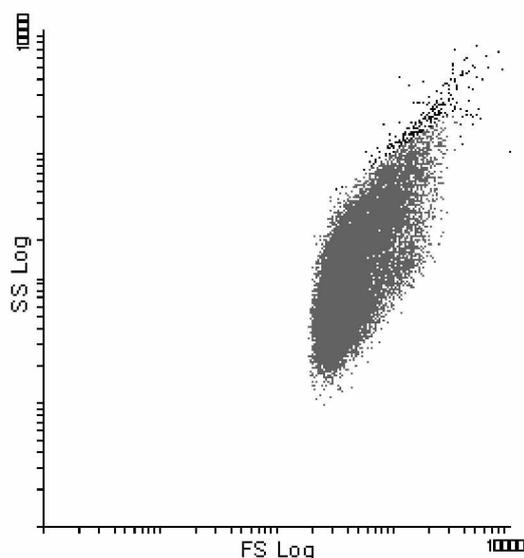


Рис. 1. Распределение клеток жаберной ткани мидий по размеру и гранулярности

Инкубация мидий в условиях глубокой гипоксии не оказывала влияния на морфологический профиль клеток жаберной ткани: достоверных различий в значениях показателей прямого и бокового рассеяния не отмечалось. Вместе с тем у клеток жаберной ткани мидий, испытывавших 24-часовой дефицит кислорода, наблюдались существенные изменения во внутриклеточном содержании активных форм кислорода (рис. 2, А). Отмечалось достоверное увеличение флуоресценции красителя с $12,3 \pm 3,2$ у. е. в контрольных пробах до $18,5 \pm 1,5$ у. е., что говорит об увеличении внутриклеточной концентрации активных форм кислорода в жаберной ткани мидий. Одновременно с этим существенно (более чем в 10 раз) возросла доля мертвых клеток в суспензиях (рис. 2, Б).

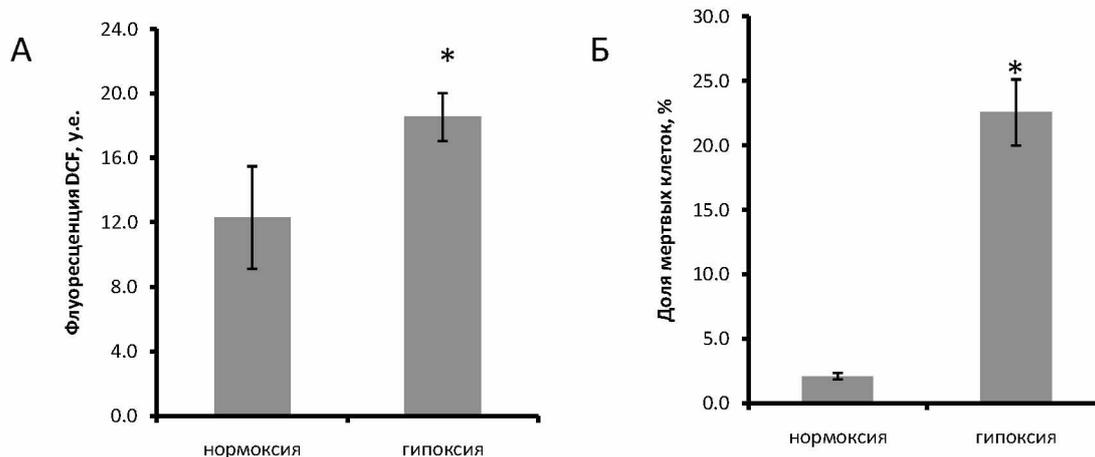


Рис. 2. Функциональное состояние клеток жаберной ткани мидий (*Mytilus galloprovincialis*) в условиях экспериментальной гипоксии:

А – содержание активных форм кислорода в клетках; Б – доля мертвых клеток в суспензии (* – достоверные различия между группами, $p \leq 0,05$, $n = 16$)

Известно, что гипоксическое воздействие часто ассоциировано с резким увеличением внутриклеточной генерации свободных радикалов. Вероятно, подобное накопление АФК в клетках в течение первых часов гипоксического воздействия связано с тем, что остаточные концентрации кислорода частично восстанавливаются комплексами II и III в дыхательной цепи митохондрий [Welker et al., 2013; Hermes-Lima et al., 2015]. С другой стороны, у некоторых представителей митилид отмечалось снижение активности антиоксидантных ферментов каталазы и супероксиддисмутазы в условиях 48–72 ч гипоксии [Rivera-Ingraham et al., 2013]. Однако данное предположение требует дальнейшего экспериментального подтверждения и не оценивалось в настоящей работе.

Вне зависимости от происхождения АФК в клетках жаберной ткани мидий увеличение их внутриклеточной концентрации при гипоксии могло вносить вклад в резкий скачок доли мертвых клеток, отмеченных в суспензиях клеток жаберной ткани мидий спустя 24 ч гипоксии. Вероятным повреждающим фактором в этом случае может выступать усиление перекисного окисления липидов мембран клеток жаберной ткани, наблюдающееся при развитии окислительного стресса. Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что гипоксия может оказывать влияние на численность циркулирующих гемоцитов в гемолимфе мидий. Наряду с миграцией гемоцитов из гемолимфы в ткани среди возможных причин подобного явления рассматривается изменение соотношения в процессах апоптоза и некроза и скоростью пролиферации, а также увеличение смертности клеток вследствие необратимых последствий воздействия дефицита кислорода [Mydlarz et al., 2006]. В настоящей работе особенности метода детекции мертвых клеток с применением красителя PI позволяют заключить, что гипоксия вызывала именно нарушения целостности мембран клеток жаберной ткани, поскольку краситель не способен проникнуть через интактную клеточную мембрану.

Таким образом, 24 ч инкубация в глубокой гипоксии вызывала изменения общей концентрации активных форм кислорода в клетках жаберной ткани мидий, свидетельствуя о функциональных перестройках тканевого антиоксидантного комплекса. Показано, что клетки жабр мидий

чрезвычайно чувствительны к низкому содержанию кислорода, и даже относительно кратковременное воздействие способно вызывать гибель клеток. Механизмы, лежащие в основе наблюдаемых изменений, требуют дальнейших исследований в этой области.

Работа выполнена в рамках внутреннего гранта СевГУ на 2020 г. «Изучение влияния гипоксии на жизнедеятельность объектов марикультуры в Черноморском регионе методами цитометрии, транскриптомики и биоинформатики».

Список литературы

Архипкин В. С., Косарев А. Н., Гинциус Ф. Н., Мигали Д. И. Сезонная изменчивость климатических полей температуры, солености и циркуляции вод Черного и Каспийского морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2013. № 5. С. 33–44.

Зацепин А. Г., Горбачкий В. В., Мысленков С. А., Дудко Д. И., Шпилев Н. Н., Ивонин Д. В., Куклев С. Б. Сравнение характеристик течений, измеренных КВ и СВЧ радиолокаторами на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море, с данными ADCP и дрейфтеров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 7. С. 250–266.

Репетин Л. Н. Пространственная и временная изменчивость температурного режима прибрежной зоны Черного моря // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу. 2012. № 26(1). С. 99–116.

Яхонтова И. В., Дергалева Ж. Т. Марикультура моллюсков на Черноморском побережье России // Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов. 2008. № 2. С. 45–47.

Clark M. S., Husmann G., Thorne M. A., Burns G., Truebano M., Peck L. S., Philipp E. E. Hypoxia impacts large adults first: consequences in a warming world // Global Change Biology. 2013. Vol. 19, N 7. P. 2251–2263.

Fernández B., Campillo J. A., Martínez-Gómez C., Benedicto J. Antioxidant responses in gills of mussel (*Mytilus galloprovincialis*) as biomarkers of environmental stress along the Spanish Mediterranean coast // Aquatic Toxicology. 2010. Vol. 9, N 2. P. 186–197.

Hermes-Lima M., Moreira D. C., Rivera-Ingraham G. A., Giraud-Billoud M., GenaroMattos T. C., Campos E. G. Preparation for oxidative stress under hypoxia and metabolic depression: revisiting the proposal two decades later // Free Radical Biology and Medicine. 2015. Vol. 89. P. 1122–1143.

Melzner F., Thomsen J., Koeve W., Oschlies A., Gutowska M. A., Bange H. W., Körtzinger A. Future ocean acidification will be amplified by hypoxia in coastal habitats // Mar. Biol. 2013. Vol. 160, N 8. P. 1875–1888.

Mydlarz L. D., Jones L. E., Harvell C. D. Innate immunity environmental drivers and disease ecology of marine and freshwater invertebrates // Ann. Rev. of Ecology and Evolution of Systems. 2006. Vol. 37. P. 251–288.

Rivera-Ingraham G., Rocchetta I., Meyer S., Abele D. Oxygen radical formation in anoxic transgression and anoxia-reoxygenation: foe or phantom? Experiments with a hypoxia tolerant bivalve // Mar. Envir. Res. 2013. Vol. 92. P. 110–119.

Turner R. E., Rabalais N. N., Justic D. Predicting summer hypoxia in the northern Gulf of Mexico: Redux // Mar. Poll. Bull. 2012. Vol. 64, N 2. P. 319–324.

Welker A. F., Moreira D. C., Campos E. G., Hermes-Lima M. Role of redox metabolism for adaptation of aquatic animals to drastic changes in oxygen availability // Comp. Biochem. and Physiol. Part A. 2013. Vol. 165, N 4. P. 384–404.

ANTIOXIDANT STATUS OF CELLS IN MUSSEL GILL TISSUE UNDER SHORT-TERM HYPOXIA

A. Lantushenko¹, Ya. Meger¹, E. Kladchenko², A. Andreyeva²

¹ Sevastopol State University, Sevastopol

² A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS, Sevastopol

In this work we investigated the effect of short-term hypoxia (24 h) on the total antioxidant activity and mortality level of cells in gill tissue of mussels, *Mytilus galloprovincialis*. Mussels are a common cultivated bivalve across the Crimean coast of the Black Sea, which frequently suffers oxygen deficit due to the peculiarities of its natural habitats. It is shown that hypoxia induces an accumulation of reactive oxygen species in gill tissue cells and leads to an increase in cell mortality level up to 22.5 ± 2.6 %.

ОСОБЕННОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА РЕКИ СВИРИ КАК ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОГО УЧАСТКА ОНЕЖСКО-БАЛТИЙСКОГО ВОДНОГО ПУТИ

О. Г. Лопичева

Вологодский государственный университет, Вологда

Исследования проводились на реке Свири, входящей в состав Онежско-Балтийского водного пути. Проанализированы природные и антропогенные факторы формирования фитопланктона в условиях зарегулированного речного стока и интенсивного судоходства. На протяжении реки выделены отличающиеся комплексом условий обитания гидробионтов три модельных участка. Показано, что в зоне влияния каскада Свирских ГЭС приоритетным фактором изменения структуры сообщества микроводорослей является гидродинамика водных масс. Выявлены изменения соотношения таксономических групп и количественных показателей развития фитопланктона на техногенно измененных участках реки Свири. Проведена оценка качества воды по показателям сапробности.

Актуальной задачей мониторинговых исследований является ранняя диагностика состояния экосистем магистральных водных путей. Это связано с многофакторным антропогенным воздействием и специфичным влиянием функционирования судоходных магистралей на водные сообщества. При большой протяженности водных путей и разнообразии сложившихся в них экосистем комплекс факторов, определяющих состояние сообществ, может сильно варьировать. В первую очередь это касается отличий природных и техногенно преобразованных участков магистрали.

Наглядный ситуационный отклик на изменение условий обитания гидробионтов можно проследить на примере фитопланктона как начального звена водного сообщества. Тем более, что это имеет практическую значимость для оценки качества воды, особенно при угрозе «цветения». Известно, что состояние фитопланктонного сообщества, включающее различные группы микроводорослей с коротким жизненным циклом и специфическими требованиями к условиям среды, служит адекватным индикатором изменения ситуации в водных экосистемах под влиянием природных и антропогенных факторов [Абакумов, 1979; Биоразнообразие водорослей..., 2006].

Целью исследований было выявление особенностей формирования фитопланктонного сообщества в условиях интенсивного судоходства и зарегулированного стока речной экосистемы, входящей в состав магистрального водного пути. В качестве объекта выбрана река Свирь, являющаяся частью Онежско-Балтийского водного пути.

С одной стороны, р. Свирь – это уникальный природный объект, соединяющий два самых больших озера в Европе – Онежское (исток) и Ладожское (устье). Большая часть бассейна реки принадлежит бассейну Онежского озера (74 %), остальная – частному водосбору реки. Длина водотока составляет 224 км, площадь ее водосбора (с учетом Онежского озера) 84,4 тыс. км². Ширина реки на всем ее протяжении колеблется от 100 м до 10–12 км (Ивинский разлив). Гидрологический и гидрохимический режим р. Свири значительно зависит от ее притоков, дренирующих болотистый водосбор. Устьями рек Свирь, Оять и Паша образуется заболоченная дельта р. Свири [Ладога, 2013]. Наибольшее влияние на формирование качества воды низовьев р. Свири и, соответственно, приустьевого участка Ладожского озера оказывает р. Паша как крупнейший левый приток, впадающий в р. Свирь в 8 км от ее устья около пос. Свирица.

С другой стороны, р. Свирь относится к важной части транспортной единой глубоководной системы европейской части России, так как от ее пропускной способности зависит интенсивность судоходства по трассе. Это потребовало зарегулирования русла данной порожистой реки, что кардинально изменило условия обитания гидробионтов, в том числе и фитопланктона.

Плотины гидроэлектростанций разделили р. Свирь на три части и обусловили своеобразное сочетание природных и техногенно преобразованных участков. Условно фоновым природным участком можно считать верхнее течение, водный режим которого зависит от состояния Онежского озера. Влияние деятельности шлюзов на гидродинамическую обстановку в верховьях р. Свири отсутствует. Среднее течение р. Свири представляет собой техногенный участок магистрали из-за функционирования каскада ГЭС: Верхне-Свирской и Нижне-Свирской. На водный режим нижнего участка существенное влияние оказывает Ладожское озеро.

С учетом особенностей условий обитания гидробионтов для отбора проб были выбраны следующие модельные участки: в верхнем течении реки участок до шлюзов Верхне-Свирской ГЭС, в среднем течении между шлюзами каскада Свирских ГЭС, в нижнем течении в устье крупного притока р. Свири – р. Паши. Исследуемые биотопы располагались в прибрежной зоне, где складывается своеобразный комплекс условий. Это связано с выраженным влиянием на состояние фитопланктона прибойно-волновой деятельности при интенсивном судоходстве, поступлением загрязняющих веществ с освоенных берегов или болотных вод в низинных участках. Прибрежье наиболее подвержено органическому загрязнению, что позволяет использовать индексы сапробности, рассчитанные по состоянию фитопланктонного сообщества, для адекватной оценки качества воды.

Отбор проб для оценки качественных и количественных характеристик фитопланктона производился в июле 2019 г. в соответствии с общепринятыми методиками [Федоров, 1979; Методы изучения..., 2003]. Пробы отбирались в поверхностном слое в объеме 0,5 л. Отобранный материал фиксировался раствором Люголя и концентрировался осадочным методом [Федоров, 1979]. Для количественного учета использовалась счетная камера Нажотта, объемом 0,01 мл. Учет клеток производился в расчете на единицу объема, а численность подсчитывалась по стандартной формуле. Биомасса определялась счетно-объемным методом, где каждой клетке придается образ геометрической фигуры [Методы изучения..., 2003]. На выбранных станциях дополнительно проводилось измерение температуры и прозрачности воды. Для определения органического загрязнения реки использовался индекс сапробности [Руководство по методам..., 1983].

Температура воды колебалась от 21 до 23 °С, а прозрачность от 0,7 до 2 м. Скорость течения также не оказывала значительного воздействия на структуру фитопланктона, изменяясь от 0,2 до 0,3 м/с.

На верхнем участке р. Свири доминирующей группой являлись цианопрокариоты, составляя 54 % от общей биомассы, среди которых преобладали *Aphanizomenon flos-aquae* и *Anabaena flos-aquae*. К субдоминантам по биомассе относилась группа зеленых водорослей, где массовыми видами были *Monoraphidium arcuatum*, *M. contortum*. Заметную долю в составе фитопланктонного сообщества составляли представители рр. *Cryptomonas* и *Chroomonas* из криптофитовых водорослей. Доля диатомовых водорослей была значительно ниже (11 %). Количественные показатели развития фитопланктона были на уровне 0,6 млн кл./л по численности, 1,1 г/м³ по биомассе. Индекс сапробности на данном участке равнялся 1,9, что позволяет отнести воду к категории «воды умеренного загрязнения».

Верхнее течение р. Свири можно отнести к фоновому участку, где отсутствуют плотины и шлюзы и приоритетное влияние на развитие фитопланктона оказывают природные факторы. Это скорость течения, планктосток Онежского озера и косвенное влияние заболоченного водосбора, определяющего гидрохимический режим водотока. Особенности выбранного для исследования мелководного прибрежного биотопа отразила структура фитопланктона с преобладанием цианопрокариот. Глубина на месте отбора проб составляла всего 0,7 м, прозрачность воды была до дна, скорость течения 0,2 м/с, а температура воды до 23 °С. Таким образом, установленная высокая доля цианопрокариот в структуре фитопланктона связана с обычным для северных рек пиком развития данной группы в период максимального прогревания. Уровень развития фитопланктона также типичен для северных малопродуктивных речных экосистем. В то же время рассчитанный для модельного участка индекс сапробности свидетельствует об органическом загрязнении, чему способствует как поступление органики с болотного водосбора, так и длительная эксплуатация реки в составе транспортного пути.

В среднем течении р. Свири на техногенно преобразованном участке, где функционирует каскад ГЭС, отмечена смена доминантов в структуре фитопланктонного сообщества. В выбранном модельном биотопе, который располагался на участке между шлюзами Верхне-Свирской и Нижне-Свирской ГЭС, доминирующей группой по численности и по биомассе являлись представители диатомовых водорослей. К массовым относились диатомеи из рр. *Stephanodiscus*, *Aulacoseira*, *Cyclotella*, а также *Tabellaria fenestrata*, *Asterionella formosa*. Численность цианопрокариот была значительно ниже, чем в верхнем течении реки (15 % от общей численности). Среди зеленых водорослей отмечался *Monoraphidium contortum*. Численность фитопланктона достигала 2,4 млн кл./л, а биомасса – 1,7 г/м³. Индекс сапробности по фитопланктону повысился до значения 2,6, что соответствует категории «вода сильного загрязнения».

На данном участке приоритетным фактором формирования фитопланктона становится антропогенный, связанный с влиянием шлюзов на гидродинамику водных масс. Это сказывается на изменении структуры фитопланктона, где значительно уменьшается доля цианопрокариот, рыхлые колонии

которых разрушаются в данных условиях. В то же время увеличивается доля диатомовых водорослей, устойчивых к механическому повреждению. Изменение структуры фитопланктона под влиянием гидродинамического воздействия ранее нами было выявлено в прибрежной зоне Шекснинского водохранилища, входящего в состав Волго-Балтийского водного пути. При неустойчивой гидродинамической обстановке ежедневно наблюдалась смена субдоминантов в структуре фитопланктона вследствие нестабильного уровня режима водохранилища, ветрового воздействия и активной волноприбойной деятельности при интенсивном судоходстве [Лопичева, 2015].

Дополнительным фактором, который оказывает влияние на состояние р. Свири в районе каскада ГЭС, служит так называемый «нетранспортный эффект». Это связано с освоенностью берегов при обслуживании и эксплуатации шлюзов, увеличивающей загрязнение реки на данном участке, что отражает заметная численность криптоноад в составе фитопланктона.

В нижнем течении р. Свири доминирующей группой фитопланктонного сообщества в районе устьев участка притока р. Паши были цианопрокариоты. К наиболее массовым относились виды из рода *Aphanizomenon*. Из зеленых водорослей отмечены *Closterium acerolum*, *Chlamydomonas sp.* Среди диатомей преобладала *Aulacoseira alpigena*. Общая численность фитопланктона составляла 0,9 млн кл./л, при биомассе 0,8 г/м³. По результатам расчета индекса сапробности 2,8 вода на данном участке относилась к классу «сильно загрязненная».

Повторная смена доминантов с диатомовых водорослей на цианопрокариот в нижнем течении р. Свири (в устье р. Паши) также подтверждает влияние динамики водных масс на фитопланктонное сообщество. Следует отметить, что дополнительно на структуру сообществ гидробионтов также оказывает влияние поток биогенов с берегов населенного пункта – пос. Свирица.

Сочетание природных и антропогенных факторов в зависимости от типа и характера экосистем сказывается на уровне и таксономической структуре фитопланктона, что отражают наши исследования.

Таким образом, приоритетным фактором формирования фитопланктонного сообщества в зоне влияния деятельности ГЭС является повышенная гидродинамика водных масс. Это явно отражает смена доминирующих групп фитопланктона до и после шлюзов каскада Свирских ГЭС. Помимо активного перемешивания воды, в прибрежной зоне складывается комплекс специфических условий, который влияет на распределение фитопланктона за счет усиленного потока биогенов с освоенной прибрежной зоны.

В целом отмечается повышенное загрязнение р. Свири. Показатели сапробности воды по фитопланктону увеличиваются от истока к устью реки. Активная эксплуатация магистрального водного пути и преобладающий болотный водосбор оказывают мощную антропогенную нагрузку на экосистему р. Свири. Установленное в верхнем и нижнем течении реки доминирование в фитопланктонном сообществе цианопрокариот требует проведения постоянного мониторинга качества воды. Их массовое развитие вызывает «цветение» воды, которое является причиной заморных процессов и токсических явлений, опасных для рыб, животных и человека.

Следует подчеркнуть, что эксплуатация крупного магистрального водного пути предполагает комплексный мониторинг за качеством воды, что сказывается на развитии туризма на данной территории с ее уникальными природными и историко-культурными рекреационными ресурсами.

Список литературы

Абакумов В. А. Основные направления изменения водных биоценозов в условиях загрязнения окружающей среды // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. С. 37–48.

Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 498 с.

Ладога [Электронный ресурс]. СПб.: Нестор-История, 2013(2015). 468 с.

Лопичева О. Г. Особенности динамики фитопланктона прибрежной части Шекснинского водохранилища: Материалы докл. XXII Всерос. молодежной науч. конф. «Актуальные проблемы биологии и экологии». Сыктывкар, 2015. С. 26–30.

Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство / автор-сост. А. П. Садчиков М.: Университет и школа, 2003. 157 с.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 240 с.

Садчиков А. П. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: Университет и школа, 2003. 157 с.

Федоров В. Д. О методах изучения фитопланктона и его активности. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 168 с.

CHARACTERISTICS OF PHYTOPLANKTON IN RIVER SVIR AS A SEMINATURAL SECTION OF THE ONEGA-BALTIC WATERWAY

O. Lopicheva

Vologda State University, Vologda

Research was conducted on the Svir River, which is part of the Onega-Baltic waterway. The natural and anthropogenic factors that have shaped phytoplankton in the context of regulated streamflow and intensive navigation were analyzed. Three model river sections with different sets of conditions for the life of aquatic organisms were selected. It was shown that in the section influenced by the chain of Svir hydroelectric power plants the key factor modifying the structure of the microalgal community is the water mass hydrodynamic characteristics. Changes were detected in the ratio of taxonomic groups and quantitative indices of phytoplankton development in artificially altered Svir River sections. Water quality was assessed for saprobity.

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА БАКТЕРИОПЛАНКТОНА ПЕЛАГИАЛИ ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Е. М. Макарова

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

В последние десятилетия наблюдается снижение влияния антропогенного фактора на Петрозаводскую губу Онежского озера. Вместе с тем из-за климатических изменений на водосборе Онежского озера отмечается увеличение поступления аллохтонного ОБ и железа с водами реки Шуи, что пагубно влияет на развитие гидробионтов. Рассмотрена динамика численности бактериопланктона пелагиали Петрозаводской губы Онежского озера в условиях изменения факторов среды.

Онежское озеро отличается высоким качеством воды в центральных и глубоководных районах. Одним из антропогенно эвтрофированных участков озера является Петрозаводская губа, которая подвержена влиянию коммунально-бытовых и сточных вод г. Петрозаводска. Тем не менее благодаря своей проточности залив имеет олиго-мезотрофный статус [Калинкина и др., 2017]. Кроме того, в настоящее время в связи с климатическими изменениями (увеличение числа дней с оттепелью в зимний период, уменьшение количества твердых осадков) с водосборной территории Онежского озера наблюдается поступление большого количества аллохтонного органического вещества (ОВ) и железа в озеро, в том числе и с водами р. Шуи. Особенно сильное влияние речные воды оказывают на развитие сообщества макрозообентоса в Петрозаводской губе [Коросов и др., 2019].

Водные микроорганизмы участвуют в процессах самоочищения озер, играя ключевую роль в жизни водоемов, а также служат надежными индикаторами загрязнения водной среды. Благодаря высокой скорости метаболизма и способности утилизировать вещества различного происхождения микроорганизмы реагируют на любые незначительные изменения условий среды [Теканова и др., 2015]. Количественное развитие бактерий в водоеме зависит от различных факторов: морфологии водоема, гидрологического, гидрофизического и гидрохимического режимов, а также от степени антропогенного влияния. Количественные показатели микробного сообщества позволяют оценить экологическое состояние водоемов и концентрацию находящихся в воде органических веществ. Также известно, что бактерии в некоторых случаях больше используют автохтонное ОБ [Kritzberg et al., 2004]. В связи с этим интересно было проследить динамику развития бактериопланктона в изменяющихся условиях среды.

Цель исследования – оценить влияние различных факторов среды на динамику бактериопланктона пелагиали Петрозаводской губы Онежского озера в многолетнем аспекте.

Общую численность бактерий (ОЧБ) определяли методом прямого счета, используя окрашенные суданом черным фильтры производства Whatmann, предварительно окрашивая бактерии акридином оранжевым [Hobbie et al., 1977; Zimmermann et al., 1977; Кузнецов, Дубинина, 1989]. Измерения проводили при помощи компьютерной программы ММС (MultiMedia-Catalog).

Для анализа данных за многолетний период 1989–2011 гг. использовали базу данных «Планктон Онежского озера» [Сярки и др., 2015] и собственные данные за 2015–2017 гг. по двум глубоководным станциям в Петрозаводской губе ст. Р-2 и ст. Р-3 (рис. 1). Выделяли два периода исследований: 1989–1999 гг. (максимальное антропогенное влияние), 2000–2017 гг. (снижение антропогенного фактора и проявление изменений климатических условий). Для корректного сравнения станций с различной глубиной использовали средневзвешенные показатели биомассы (В) и ОЧБ. В оценку многолетней изменчивости численности бактериопланктона вошли данные, относящиеся к периоду «биологического лета», когда температура поверхностного слоя воды превышала 10 °С.

Статистический анализ выполнен в лицензированном пакете StatisticaAdvanced 10 forWindowsRu.

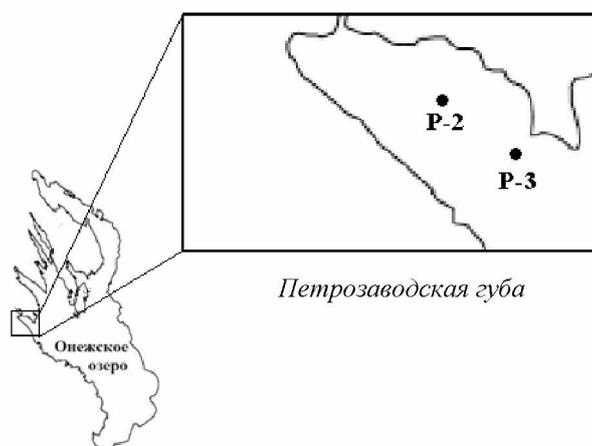


Рис. 1. Схема расположения отбора проб в Петрозаводской губе Онежского озера

За период 1989–1999 гг. ОЧБ изменялась от 0,68 до 3,53 (в среднем 1,85) млн кл./мл. Разница между минимальными и максимальными показателями составляла 5 раз. За период 2000–2017 гг. ОЧБ изменялась в пределах 0,27–3,72 (в среднем 1,61) млн кл./мл. Максимальные и минимальные значения ОЧБ разнились в 14 раз. Несмотря на некоторое снижение средних показателей ОЧБ за 2000–2017 гг., по критерию Манна – Уитни статистически значимых различий численности между двумя выборками не выявлено.

Как видно из рис. 2, в период интенсивного антропогенного влияния наблюдалась тенденция к возрастанию тотального бактериопланктона, а в период снижения антропогенного воздействия – некоторое снижение ОЧБ, однако за оба периода статистически значимых изменений не выявлено.

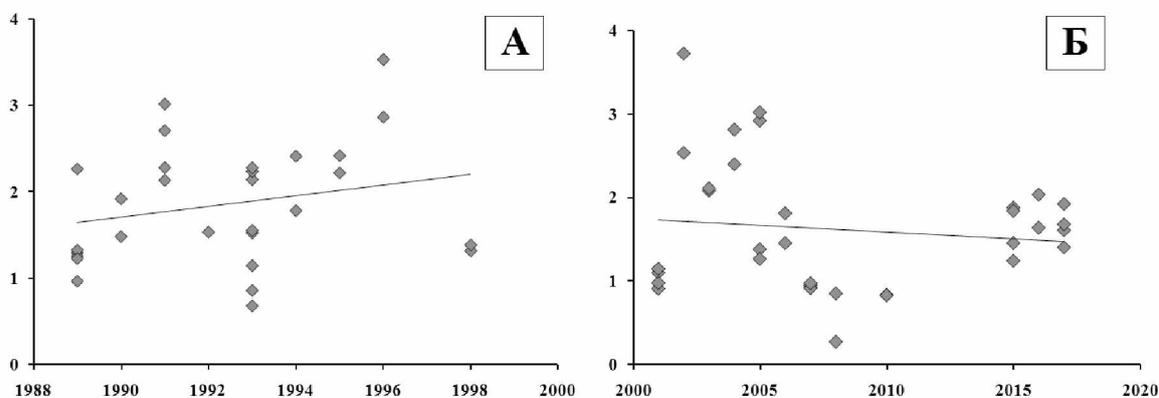


Рис. 2. ОЧБ (млн кл./мл) пелагиали Петрозаводской губы за периоды 1989–1999 гг. (А) и 2000–2017 гг. (Б)

Сравнение среднесезонных показателей численности и биомассы за два периода показало, что численность и биомасса за период 2000–2017 гг. были несколько ниже, чем те же показатели за период 1989–1999 гг., но достоверно не отличались (табл.).

Среднемесячные значения общей численности (ОЧБ, млн кл./мл) и биомассы (В, г/м³) бактериопланктона пелагиали Петрозаводской губы

Месяц отбора	1989–1999 гг.		2000–2017 гг.	
	ОЧБ	В	ОЧБ	В
Март	1,16	0,49	0,33	0,25
Май	2,25	0,79	–	–
Июнь	1,96	0,64	1,87	0,64
Июль	1,66	0,67	1,56	0,52
Август	1,98	0,69	1,33	0,45
Сентябрь	1,94	0,67	1,11	0,37
Октябрь	1,63	0,57	1,46	0,47

Примечание. «–» – отсутствие данных.

Несмотря на то, что климатические изменения в Петрозаводской губе особенно ярко выражены в зимне-весенний период [Коросов и др., 2019], ОЧБ за период март – июнь несущественно отличается от показателей тотального бактериопланктона других месяцев.

В соответствии с классификацией О. П. Оксюка с соавторами [1993] по показателям ОЧБ пелагиаль Петрозаводской губы в период открытой воды за 1989–1999 гг. характеризовалась как мезотрофная с удовлетворительным качеством воды, за 2000–2017 гг. – олиго-мезотрофная с переходным классом качества воды чистая – удовлетворительной чистоты.

В целом за многолетний период пелагиаль Петрозаводской губы Онежского озера сохраняет статус мезотрофной экосистемы. Численность бактерий за последние десятилетия изменяется незначительно. Влияния климатического фактора на численность бактериопланктона не выявлено.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-44-100007.

Список литературы

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 4–18.

Коросов А. В., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Рыжиков А. В. Закономерности распределения поступившего с речным стоком железа в Петрозаводской губе Онежского озера // Региональная экология. 2019. № 1(55). С. 13–24.

Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.

Оксюк О. П., Жуковский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 2, № 4. С. 62–76.

Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Планктон пелагиали Онежского озера. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2015620274, 13.02.2015. Заявка № 2014621816 от 18.12.2014.

Теканова Е. В., Макарова Е. М., Калинкина Н. М. Оценка состояния воды притоков Онежского озера в условиях антропогенного воздействия по микробиологическим и токсикологическим показателям // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 44–52.

Hobbie J. E., Daley R. J., Jasper S. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy // Applied and Environmental Microbiology. 1977. Vol. 33, N 5. P. 1225–1228.

Kritzberg E. S., Cole J. J., Pace M. L., Granéli W., Bade D. L. Autochthonous versus allochthonous carbon sources of bacteria: Results from whole-lake 13 °C addition experiments // Limnology and Oceanography. 2004. Vol. 49, N 2. P. 588–596.

Zimmermann R., Iturriaga R., Becker-Birck J. Simultaneous determination of the total number of aquatic bacteria and the number thereof involved in respiration // Applied and Environmental Microbiology. 1977. Vol. 36, N 6. P. 926–935.

LONG-TERM PATTERNS OF PELAGIC BACTERIAL PLANKTON IN PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGO

E. Makarova

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

In recent decades, human impact on Petrozavodsk Bay of Lake Onego has been decreasing. At the same time, due to climatic changes in Lake Onego catchment, the bay has been receiving increased amounts of allochthonous organic matter and iron from the Shuja River, which adversely affects the development of aquatic organisms. Changes in bacterial plankton numbers in the pelagic zone of Petrozavodsk Bay, Lake Onego in connection with the alteration of environmental factors are described.

МШАНКИ КАМЕНИСТЫХ ЛИТОРАЛЬНЫХ ОТМЕЛЕЙ ШХЕРНОГО РАЙОНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

И. А. Мухин

Вологодский государственный университет, Вологда

Рассмотрены особенности поселения мшанок на каменном обломочном материале, формирующем пляжи и литоральные отмели в шхерном районе Ладожского озера. Для района исследования указано пять видов мшанок. Показано, что плотность заселения субстрата связана с его размером.

Скальная литораль – специфический биотоп для перифитона, который широко представлен в шхерном районе Ладожского озера. Скалы и скальные обломки – прекрасный субстрат для прикрепленных организмов – твердый, слабо подверженный изменчивости и деформации в масштабах времени существования перифитона. Благодаря прибою у скал вода литоральной зоны постоянно обогащается кислородом и взвесью детрита, однако этот же прибой препятствует поселению, механически нарушая колонии или смывая отдельных особей, не давая прикрепиться подвижным стадиям. Интересна каменистая литораль также тем, что на одной и той же площади дна могут реализовываться очень различные ниши микроперифитонных организмов: в зависимости от ориентации обретаемой поверхности относительно течения воды – открытые и закрытые местообитания.

Очевидно, что соотношение и разнообразие экологических ниш микроперифитона скальных литоральных отмелей зависит от структуры их поверхности и, в частности, от размерной структуры складывающихся их обломков. Каждый обломок породы, размер которого много больше размера обрастателя, представляет для последнего отдельный субстрат, характеризующийся пространственной неоднородностью. Сторона, на которой обломок лежит на дне, сильно отличается от сторон, которые обращены в сторону прибоя или в пространства между данным и соседними обломками. Поэтому можно говорить о том, что каменистая литоральная отмель представляет собой сложный мозаичный биотоп для перифитона, мозаичность которого зависит от масштаба рассматриваемых объектов. С этой точки зрения можно ожидать влияния фракционной характеристики слагающих литоральную отмель обломков на структуру сообществ обрастателей.

Ранее микроперифитон литоральных отмелей в таком разрезе не исследовался. Тем не менее понимание особенностей экологии организмов необходимо для моделирования и прогнозирования трансформаций экосистем при различных, в том числе и антропогенных, процессах. В частности, аналогичные каменистым отмелям биотопы часто формируются при трансформации берегов – укреплении, прибрежном строительстве и т. п.

Среди перифитонных организмов роль эдификатора в пресных водах часто играют представители мшанок (Bryozoa). Это колониальные организмы, питающиеся с помощью фильтрации, как правило, ведущие неподвижный образ жизни. Для мшанок характерно занятие разнообразных

по природе субстратов в различных частях водоема и широкое распространение. Они могут составлять основу биомассы эпибентических и литоральных сообществ, вносят значительный вклад в круговорот вещества.

Колонии мшанок различны по размеру и структуре. Среди известных науке видов размах диаметра колоний составляет от 1 мм до 1 м и более [Ryland, 2005], однако для отмеченных в озерах Карелии мшанок характерны размеры, не превышающие первого десятка сантиметров. Толщина колоний не превышает 2–5 см, но, как правило, она меньше. Структура и характер колонии также различаются у отдельных групп. Она может быть как желеобразной, так и иметь твердый скелет с кальцинированными стенками. Такие колонии могут образовывать корочки с шероховатой поверхностью или тонкие ветвящиеся веточки. Это разнообразие очень важно с точки зрения микроорганизмов, для которых колония мшанок представляет собой местообитание, которое в том числе выступает как рефугиум [Ryland, 2005].

Цель настоящей работы – выявить особенности населения мшанок каменистых отмелей. Исследования проводили в августе 2019 г. на северо-восточном побережье Ладожского озера, на полуострове Хунукка. Материал собирали на трех пляжах, защищенных от волн в северо-западной части полуострова (рис. 1). Сбор проводился ручным способом, выбранные случайным образом обломки с глубины до 40 см просматривались, фиксировались наличие мшанок, их вид, количество зооидов в колонии. На каждом участке просматривалось около 100 обломков. Для определения образцы мшанок соскабливались и просматривались в полевых условиях под микроскопом при увеличении 10×15 . Определяли по [Определитель..., 2016]. Для каждого обломка также определяли принадлежность к размерной группе следующим образом: максимальный размер до 3 см – мелкий; 3–10 – средний; более 10 см – крупный. Размерную структуру отмели определяли, подсчитывая количество обломков каждой размерной фракции в рамке 1×1 м. Для сравнения рассмотрен также некаменистый субстрат – листья горца земноводного (*Persicaria amphibia*), произрастающего в мелководной бухте над отмелью 3 (см. рис. 1).

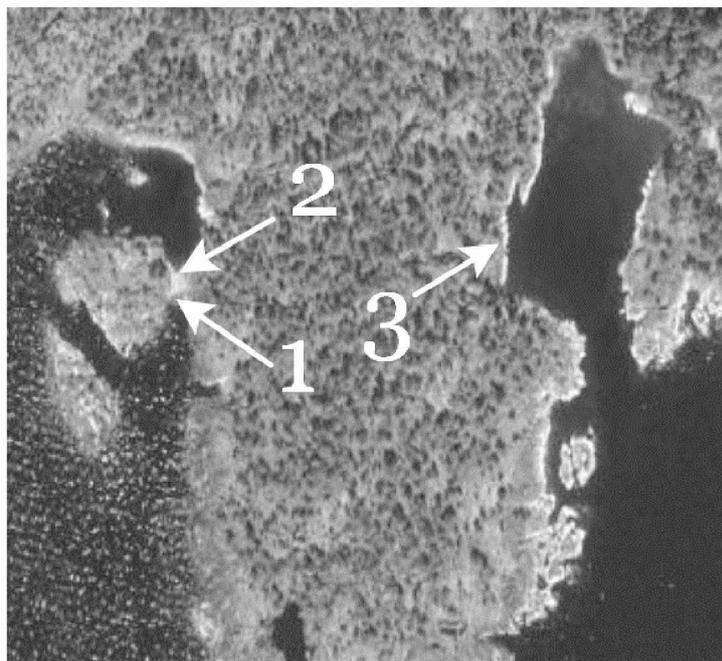


Рис. 1. Схема расположения обследуемых отмелей

Как уже отмечалось, все три изучаемые литоральные отмели находились в защищенных от прямого действия волн местах, однако были по-разному ориентированы относительно сторон света. Отмели 1 и 2 в большей степени подвержены волновому воздействию с западной стороны, тогда как отмель 3 – с юго-восточной. Отличались они и по фракционному составу (рис. 2). Обломки крупного размера составляли 15–20 % от общего количества на всех исследованных участках, но по соотношению средних и мелких фрагментов отмель 1 отличается от остальных, где преобладают фрагменты среднего размера.

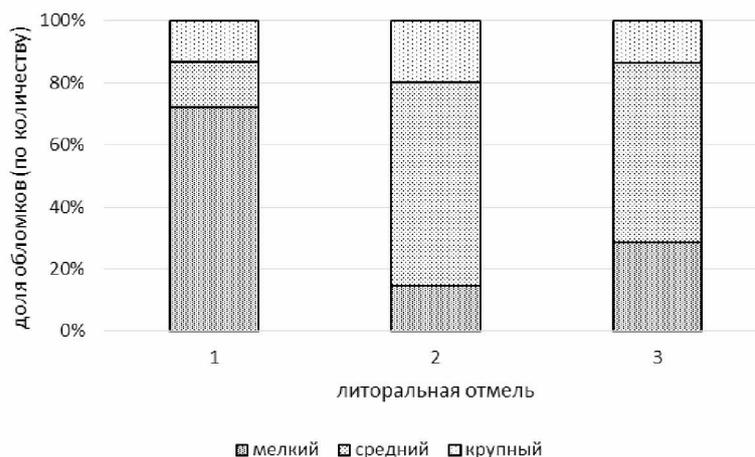


Рис. 2. Размерная структура обломочного материала исследованных литоральных отмелей

Всего выявлено пять видов мшанок: *Frediricella* sp., *Plumatella emarginata* Allman, 1844, *Plumatella fruticosa* Pallas, 1768, *Paludicella* sp., *Hyalinella punctata* Hancock, 1850. Последняя обнаруживалась только на листьях горца земноводного, произрастающего в более глубокой части литоральной отмели 3. Каменистые субстраты населяли четыре вида мшанок (табл.).

Встречаемость различных видов мшанок на обломках разного размера

От-мель	Размер обломка	Число обследо-ванных обломков	Встречаемость на обломке (доля от числа обследованных), %			
			<i>Frediricella</i> sp.	<i>Plumatella emarginata</i>	<i>Plumatella fruticosa</i>	<i>Paludicella</i> sp.
1	мелкий	118	0,8	11,9	0,8	0,0
	средний	48	4,2	0,0	0,0	0,0
	крупный	12	0,0	0,0	0,0	0,0
2	мелкий	14	0,0	50,0	7,1	0,0
	средний	78	7,7	0,0	1,3	3,8
	крупный	2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	мелкий	40	0,0	0,0	0,0	0,0
	средний	41	0,0	4,9	0,0	0,0
	крупный	1	0,0	0,0	0,0	0,0

Мшанок не было отмечено на крупных обломках, что, впрочем, может быть связано с их малой представленностью в выборке. В среднем плотность населения мшанками каменистых обломков отличалась не сильно и составляла от 11 до 15 зооидов на обломке (как правило, одна, редко две-три колонии). На всех трех отмелях отмечен лишь вид *Plumatella emarginata*, и он единственный, населяющий каменистую отмель 3, где встречался лишь на обломках среднего размера. Болотница (*Paludicella* sp.) отмечена также только на одной отмели (2) и также только на обломках средней размерной группы. Основу сообществ отмелей 1 и 2 составляют *Frediricella* sp., *Plumatella emarginata* и *P. fruticosa*.

На листьях горца земноводного отмечен лишь один вид мшанок – *Hyalinella punctata*. Всего в результате просмотра более тысячи листьев обнаружены 3 колонии в среднем по 4 зооида. Плотность населения этого субстрата составляет, таким образом, 0,29 зооидов/см².

Мшанки чаще встречались на обломках мелкого размера – в среднем на 5,9 (± 2,1) % осмотренных. Несколько реже – на средних – на 1,8 (± 0,07) % обследованных. При этом доля населенных мшанками обломков никак не соотносится с частотой встречаемости обломка данного размера на отмели. На обломках малого размера значительно чаще, чем среднего, встречались мшанки рода *Plumatella* – в 62 % против 5 % и 8 % против 1 % случаев для *P. emarginata* и *P. fruticosa*, соответственно. Представители родов *Frediricella* и *Plumatella*, напротив, чаще отмечались на обломках среднего размера.

В отношении различных отмелей различия в населенности мшанками каменных обломков менее выражены. Наиболее часто мшанки отмечались на участке 2 – в среднем на 1,6 % обломков; 0,8 % и 0,2 % – для первого и третьего участка, соответственно.

Зная среднее количество обломков каждого размерного класса на участке дна площадью один метр, можно оценить общее количество мшанок на проективную площадь дна. Наибольшая плотность, чуть менее 70 зооидов/м², характеризует отмель 2. Более 40 % от суммарной плотности на этой отмели приходится на колонии *Frediricella* sp., 30 % – на *Paludicella* sp. На отмели 1 плотность значительно меньше – 11 зооидов/м², 55 % из которых приходится на колонии *Plumatella emarginata*. Отмель 3, на которой отмечена лишь *Plumatella emarginata*, характеризуется наименьшей плотностью мшанок – 2 зооида/м². Оценка плотности зарастания горцем и количества листьев на квадратный метр позволяет также оценить плотность мшанок, поселяющихся на листьях на площадь акватории как 24 зооида/м².

Таким образом, популяции мшанок качественно и количественно отличаются на скальных обломках различной размерной группы. Отличия между населением обломков различного размера более выражены, чем различия между населением различных каменистых отмелей, независимо от их расположения. При этом среднее количество зооидов на одном обломке незначительно отличается у разных видов мшанок.

Список литературы

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос. СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 457 с.

Ryland J. S. Bryozoa: an introductory overview // *Denisia* 16, zugleich Kataloge der OÖ. Landesmuseen Neue Serie. 2005. 28. P. 9–20.

BRYOZOANS OF STONY LITTORAL SANDY BEACHES OF LAKE LADOGA SKERRIED REGION

I. Mukhin

Vologda State University, Vologda

The paper examines the characteristics of a colony of bryozoans on the clastic rock material that constitutes beaches and littoral shallows in the skerried region of Lake Ladoga. Five species of bryozoans are reported from the study area. It is demonstrated that the population density on the substrate is related to its size.

ФАКТОРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОПУЛЯЦИИ *ASELLUS AQUATICUS* (CRUSTACEA, ISOPODA) СКАЛЬНОЙ ЛИТОРАЛИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

М. Д. Петухова¹, А. Д. Старухина², И. А. Мухин¹, Д. С. Дудакова³

¹ *Вологодский государственный университет, Вологда*

² *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

³ *Институт озераедения РАН, Санкт-Петербург*

В период с 6 по 13 августа 2019 г. в шхерном районе Ладожского озера на каменистой литорали в пределах глубин 0,15–0,20 м изучались особенности пространственного распределения водяного ослика *Asellus aquaticus*. На участке береговой линии длиной в 50 м было заложено 9 площадок. Использовалась квадратная рамка со стороной 1 м, в пределах которой выбиралось по 10 обломков (в случае наличия такого количества) из пяти размерных классов, и с них проводился сбор рачков с учетом стороны обломка. Обнаружено неравномерное распределение обломков разной крупности на малых глубинах, зависящее от элементов формы береговой линии и определяющее различия в плотности осликов в пространстве масштаба десятков метров.

Выявлено предпочтение водяными осликами обломков размерами от 3 до 20 см; максимальная плотность наблюдалась для обломков длиной 10–20 см. Наиболее предпочитаемой рачком поверхностью обломка была нижняя: в среднем на ней сосредотачивался 61 % особей. На верхней поверхности встречалось 30 % особей и лишь 19 % – на боковой.

Asellus aquaticus широко распространены в водоемах Европы и относятся к экологической группе бентосных организмов. Ослики являются кормовой базой основных промысловых видов рыб, таких, как корюшка. Также они являются биоиндикаторными организмами [Бирштейн, 1951; Водунов, Токинова, 2019; O'Callaghan et al., 2019]. Достаточно хорошо известно предпочтение осликами гниющей растительности и детрита, которые они используют в качестве пищи, и изучено распределение их на таких субстратах [Graça et al., 1993; Чертопруд, 2005]. В то же время особенности существования популяций водных осликов, формирующихся на каменистом дне, изучены мало. Частично это связано с методическими сложностями [Руководство..., 1983]. Стандартные инструменты, используемые для каменистых субстратов (сачки, скребки и поршневые пробоотборники), не дают возможности оценить распределение рачков в пределах конкретного обломка и не всегда позволяют отлавливать все организмы, находящие укрытие на нижней и боковой поверхностях обломков, что приводит к недооценке реальной плотности популяции.

Северная часть Ладожского озера лежит на Балтийском щите, который сложен коренными породами архейского и протерозойского возраста. Это формирует шхерный ландшафт, характеризующийся высокой изрезанностью берега, большим числом островов и резкими перепадами глубин. Большую часть береговой линии занимают здесь пляжи, сложенные каменистыми обломками различного размера и происхождения [Ладога, 2013].

Цель работы – выявить факторы, влияющие на пространственную структуру популяции водных осликов в пределах каменистой литорали.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в период с 6 по 13 августа 2019 г. в небольшой мелководной (глубина до 2,5 м), защищенной от волн бухте (координаты 61°35'57,4"N 31°06'41,3"E), расположенной в северо-западной части полуострова Хунукка в шхерном районе Ладожского озера (рис. 1).

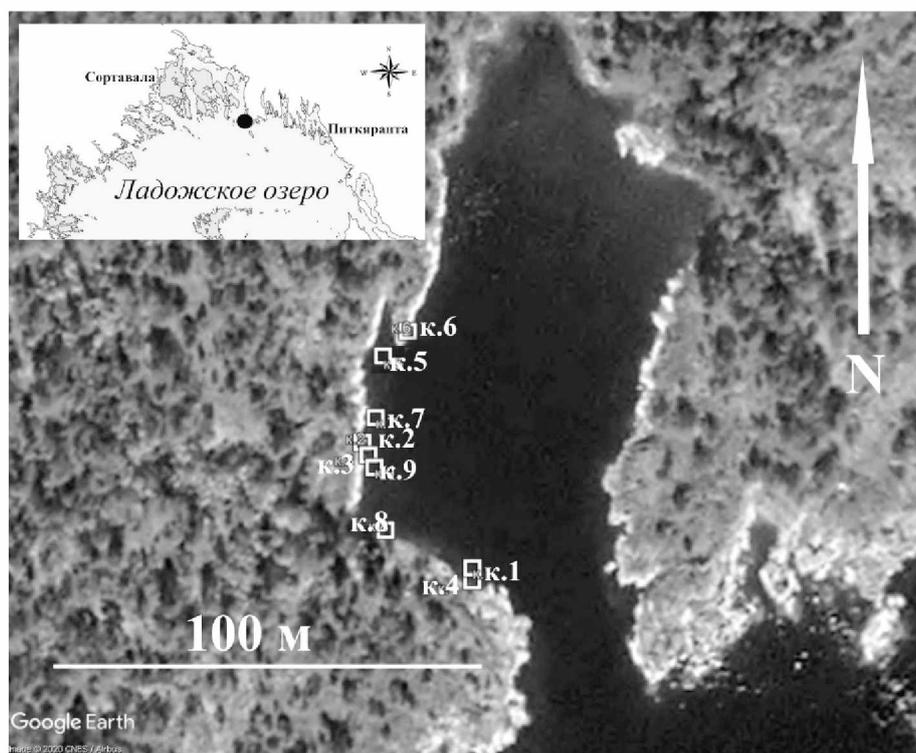


Рис. 1. Схема размещения тестовых площадок

В районе исследования были представлены различные типы донной поверхности и осадков: скальная, каменистая и зарастающая на каменистых и песчаных грунтах. Исследования были продолжением работ в скальной литорали, начатых нами ранее; была использована аналогичная методика [Дудакова и др., 2017]. В ходе исследований было заложено 9 площадок размером 100 × 100 см, которые располагались на глубинах 0,15–0,2 м. На каждой площадке подсчитывалось число обломков разной размерной группы (табл.). Затем с десяти обломков (это относилось к тем размерным группам, где общее количество обломков в квадрате было больше 10; во всех остальных случаях осматривались все обломки данного размерного класса) ручным методом проводился сбор водяных осликов *Asellus aquaticus*. В пределах каждого обломка отдельно учитывались особи, встречаемые на разных гранях: верхней, нижней и боковой. Сборы проводились в дневное или вечернее время с 11 до 18 час. По полученным данным рассчитаны стандартные статистические параметры (средние, ошибки средних, дисперсия). Статистический анализ проводился в программе STATISTICA.

Размерные группы обломков

Размерный класс обломков	Линейные размеры, см
1	1–3
2	3–10
3	10–20
4	20–50
5	50–100

Результаты и их обсуждение

1. Изменение условий накопления обломочного материала вдоль береговой линии и влияние характеристик залива на распределение водяных осликов

Распределение подводных каменистых обломков и скальных поверхностей было крайне гетерогенно на протяжении изученного участка береговой линии. Участки, примыкавшие к скальным выступам (площадки 1, 4, 5 и 6), содержали большой процент крупных обломков. Доля проективного покрытия обломков четвертого размерного класса на площадках, заложенных в пределах этой части берега, составляла от 16 до 53 % (в среднем 27 %), третьей группы – от 22 до 34 (28,5 %). В зоне сноса в вогнутой части залива (площадки 2, 3, 7 и 9) концентрировались более мелкие обломки: доля обломков первого размерного класса составляла от 69,5 до 91 % (в среднем 81 %). Такие различия в крупности повлияли на распределение водяных осликов. Плотность населения рачков на участках с большой долей крупных обломков была на два порядка выше, чем на участках с доминированием мелких обломков: в среднем 100 и 7 экз./м², соответственно.

Максимальная плотность отмечена на площадках 5 и 6, наиболее удаленных от устья бухты, на которых шло наиболее интенсивное накопление детрита рядом с зарослями рдеста, осоки и тростника. В среднем плотность *Asellus aquaticus* здесь составила 163 экз./м². Тогда как в аналогичных условиях устьевое участка (площадки 1 и 4) среднее значение численности осликов было лишь 36 экз./м².

2. Влияние размера обломков на плотность осликов

Наибольшие значения численности водяных осликов отмечены на обломках 3-го размерного класса (10–20 см): 0,25 экз./обломок, или 25 экз./100 обломков (рис. 2). На обломках 2-го и 4-го размерных классов плотность рачков была ниже: 17 и 14 экз./100 обломков, соответственно. Обломок размером более 50 см (5-й размерный класс) встречен лишь на одной площадке, и на нем было отмечено отсутствие водяных осликов, что может говорить об отсутствии предпочтения крупных поверхностей этим видом. Наблюдение на монолитных скальных поверхностях показывает, что рачки также избегают их. На самых мелких обломках (1-й размерный класс; 1–3 см) число встреченных рачков было также очень невысоким: 4 экз./100 обломков. Это объясняется тем, что взрослые особи рачков достигают длины 1,5–1,7 см, поэтому им сложно использовать обломки сопоставимого размера в качестве укрытия [Жизнь животных, 1968].

На единицу площади обломков каждого размерного класса происходило закономерное снижение плотности организмов (рис. 2). Мы объясняем это тем, что доступной и наиболее благоприятной для осликов является определенная зона обломка, закрытая со стороны поверхности, но при этом не соприкасающаяся плотно с нижележащим субстратом. По мере увеличения размера

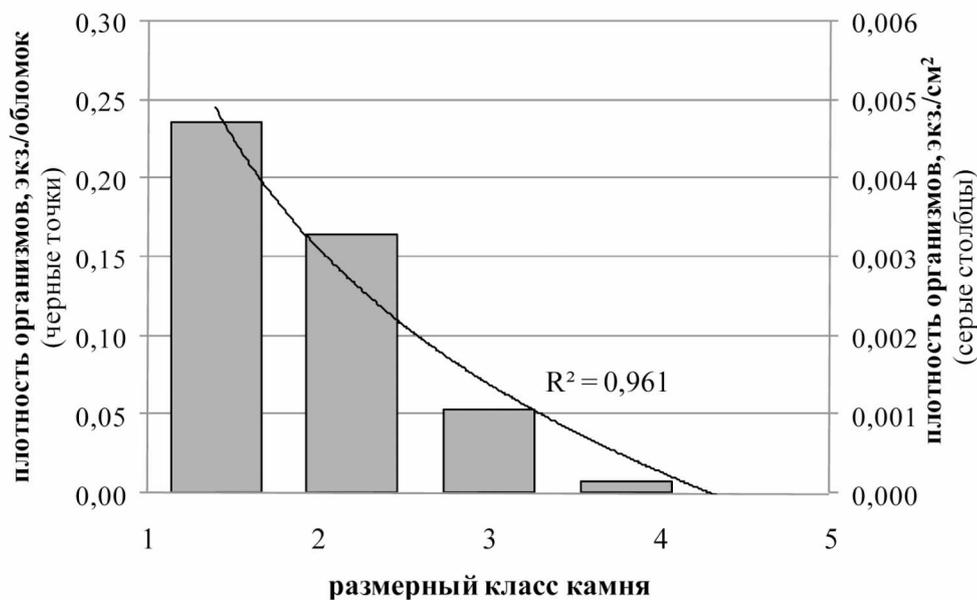


Рис. 2. Плотность поселения водяных осликов в зависимости от размера обломков

обломка (и его общей площади) доля этой зоны в площади обломка снижается, что и приводит к снижению плотности населения осликов. Таким образом, устойчивая закономерность изменения плотности населения говорит о наличии избирательности осликов к микроместообитанию на каждом конкретном обломке. Это определяет и оптимальный, с точки зрения плотности населения осликов, размер обломка. Мы видим четкую куполообразную кривую, которая показывает, что наибольшее количество организмов находят убежище на обломках среднего размера.

3. Распределение водяных осликов по сторонам обломка

Согласно полученным данным было выявлено, что *Asellus aquaticus* больше предпочитает нижнюю часть обломка (в среднем здесь встречался 61 % особей от общего числа осликов на обломке) (рис. 3). Связано это с тем, что водяные ослики – ночные животные и днем они прячутся под обломками от возможных неблагоприятных факторов [Бирштейн, 1951; Жизнь животных, 1968]. На верхней поверхности встречалось 30 % особей и лишь 19 % – на боковой. При этом количество осликов на верхней стороне коррелировало с общим числом особей на данном обломке, то есть встреча их на верхней, не предпочитаемой поверхности, носила случайный характер.

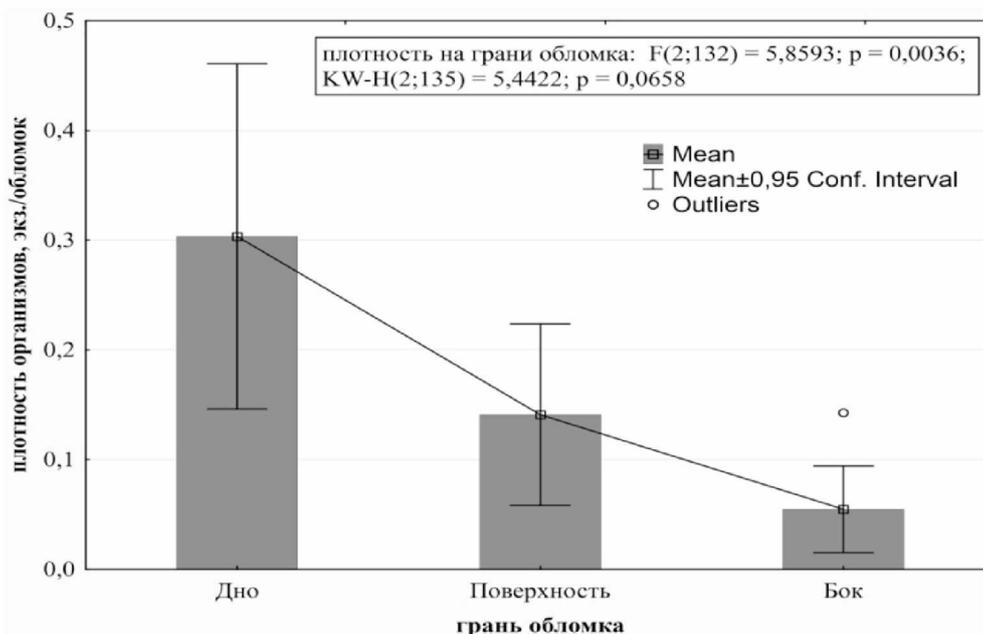


Рис. 3. Плотность водяных осликов на разных гранях обломков

Выводы

1. Более высокая плотность рачков отмечена на участках с более высокой долей крупных обломков по сравнению с участками с доминированием более мелких размеров, неравномерное накопление которых обусловлено особенностями элементов формы береговой линии.
2. Максимальная плотность организмов наблюдается на участках, где выражено накопление детрита, недалеко от зарослей макрофитов.
3. Оптимальным с точки зрения расположения животных на твердой каменистой поверхности являются обломки размерами 3–20 см.
4. Наиболее предпочтительной для водяных осликов является нижняя часть обломков.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Список литературы

- Бирштейн Я. А. Пресноводные ослики (*Asellota*). Ракообразные. Том VII. Вып. 5. Фауна СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1951. 144 с.
- Водунов Н. Р., Токинова Р. П. Динамика количественной и размерно-возрастной структуры водяного ослика (*Crustacea, Isopoda*) в родниковом озере // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса: Материалы VII науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. уч. (Москва, 14–15 ноября 2019 г.). М., 2019. С. 91–93.
- Дудакова Д. С., Дудаков М. О., Лопичева О. Г. Особенности микрораспределения бентоса каменистой литорали Ладожского озера // География: развитие науки и образования: коллективная монография по материалам междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 20–23 апреля 2017 г.). Ч. 1. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2017. С. 240–245.
- Жизнь животных: в 6 т. Т. 2: Беспозвоночные / под ред. Л. А. Зенкевича. Л.: Просвещение, 1968. 363 с.
- Ладога / под ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
- Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.
- Черномырдин М. В. Гидробиологические экскурсии в Подмосковье. М., 2005. 49 с.
- Graça M., Maltby L., Calow P. Importance of fungi in the diet of *Gammarus pulex* and *Asellus aquaticus* – II. Effects on growth, reproduction and physiology // *Oecologia*. 1993. Vol. 96, N 3. P. 304–309.
- O'Callaghan I., Harrison S. S. C., Fitzpatrick D., Sullivan T. The freshwater isopod *Asellus aquaticus* as a model biomonitor of environmental pollution: A review // *Chemosphere*. 2019. Vol. 235. P. 498–509.

FACTORS FOR THE SPATIAL STRUCTURE OF THE *ASELLUS AQUATICUS* (CRUSTACEA, ISOPODA) POPULATION IN THE ROCKY LITTORAL ZONE OF LAKE LADOGA

M. Petukhova¹, A. Starukhina², I. Mukhin¹, D. Dudakova³

¹ Vologda State University, Vologda

² St. Petersburg State University, St. Petersburg

³ Institute of Limnology RAS, St. Petersburg

Patterns of the spatial distribution of the freshwater isopod *Asellus aquaticus* at 0.15–0.20 m depths in the rocky littoral zone in the skerries of Lake Ladoga were studied on August 6–13, 2019. Nine sites were surveyed in a 50-m-long stretch of the shoreline. A square frame with a side of 1 m was used, within which 10 rock fragments (if present) from each of five size classes were selected, from which crustaceans were collected, taking into account the side of the stone. An uneven distribution of clasts of different sizes at shallow depths was detected, which correlated with the shape of the shoreline. It predetermined the differences in isopod densities at a spatial scale of tens of meters. *Asellus aquaticus* showed preference for stones 3 to 20 cm in size; their maximum density was observed on fragments 10–20 cm long. The most preferred surface of the stone for the crustaceans was the lower one: on average, 61 % of individuals concentrated on it. The upper surface held 30 % of individuals, and the lateral side only 19 %.

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПА РОСТА ОКУНЯ (*PERCA FLUVIATILIS* L.) МЛАДШИХ ВОЗРАСТОВ В ЧУДСКОМ ОЗЕРЕ

Е. С. Пимеенко, А. В. Черевичко

Псковское отделение ФГБНУ Всероссийский институт рыбного хозяйства и океанографии (ПсковВНИРО), Псков

Изучены размерно-возрастной состав и урожайность поколений окуня (*Perca fluviatilis* L., 1758) Чудского озера в период 2011–2019 гг. Отмечено снижение темпа линейного и весового роста рыб младших возрастов в последние годы, связанное с изменением характера питания. В частности, это выражается в более продолжительном периоде питания исключительно зоопланктоном и задержкой перехода на рыбную пищу. Определен состав зоопланктонных организмов, потребляемых окунем, выявлена избирательность рыб младших возрастов в пользу крупных хищных ветвистоусых ракообразных *Leptodora kindtii* (Focke) и *Bythotrephes brevimanus* (Lilljeborg).

Чудско-Псковское озеро – это крупный озерный комплекс, расположенный на Северо-Западе России на границе с Эстонией. По площади (3558 км²) оно занимает четвертое место среди пресноводных озер Европы и имеет важное средообразующее и рыбохозяйственное значение.

Одним из самых многочисленных промысловых видов рыб водоема является окунь (*Perca fluviatilis* L., 1758). Этот вид достаточно многочислен и широко распространен по всему водоему. Вылов окуня в Чудско-Псковском озере в последние годы находился в диапазоне 1500–1900 т, его доля в общем вылове рыбы в среднем достигает 30 %.

Основные аспекты биологии и экологии окуня Чудско-Псковского водоема были изучены ранее, в 50–60-е гг. прошлого столетия [Ширкова, 1966; Пиху Э. Р., Пиху Э. Х., 1974]. По имеющимся данным, численность окуня в водоеме зависит главным образом от гидротермических условий. Окунь обладает целым рядом приспособительных свойств, которые позволяют отнести его к эврибионтным рыбам, способным создавать большую численность. Несмотря на то, что в Чудско-Псковском озере добывается большое количество молоди окуня, его численность остается на стабильно высоком уровне.

Вопрос питания окуня Чудско-Псковского озера также достаточно изучен. По данным А. П. Широковой, окунь на первом году жизни питается в основном зоопланктоном, который имеет большое значение в пище рыб длиной до 10 см. Окунь начинает хищничать на втором году жизни при длине от 7–8 см, и доля рыбы в его пище постепенно увеличивается [Ширкова, 1966]. По данным Э. Р. Пиху, зоопланктон является единственной пищей в желудках окуня младших возрастов не только открытой части водоема, но и в прибрежной зоне. Даже более крупные особи (свыше 10 см), которые в большинстве случаев являются типичными бентофагами, в Чудско-Псковском озере потребляют много зоопланктона. Соответственно на первом и втором году жизни окунь в какой-то мере может быть конкурентом планктоноядных рыб [Пиху Э. Х., Пиху Э. Р., 1974].

Некоторые данные по питанию хищных рыб Чудско-Псковского озера были собраны в 80-е гг. прошлого века [Антипова, Концевая, 1994]. В работе показано, что окунь до двухлетнего возраста питается исключительно ветвистоусыми ракообразными (65–100 % по массе) с количественным преобладанием *Leptodora kindtii* и *Bythotrephes longimanus*. В пище рыб в возрасте 2+ потребление ветвистоусых ракообразных заметно снижается. С четырехлетнего возраста окунь питается исключительно рыбами, в основном собственной молодью и снетком. Средняя величина индекса наполнения желудков колебалась в пределах 24–180 ‰.

Для сравнения, в еще более крупном водоеме Северо-Запада России – Ладожском озере зоопланктон также играет основную роль в питании молоди окуня. В двухлетнем возрасте (длина 6–10 см) основу питания составляют ракообразные рода *Leptodora*, как по массе, так и по встречаемости. В возрасте 2+ – 4+ доля рыбы в пище окуня постепенно растет до 50–80 % массы пищевого комка [Дрозжина, 1982].

Изучение размерно-возрастного состава окуня и его запасов проводилось в рамках основной научно-исследовательской темы Псковского филиала ФГБНУ «ВНИРО», посвященной разработке материалов, обосновывающих общие допустимые уловы биологических ресурсов в Чудско-Псковском озере.

Ихтиологический материал собирался в период 2011–2019 гг. (2011–2014 гг. данные отчетов, 2015–2019 гг. – собственные данные автора) из орудий лова, работающих в научно-иссле-

довательском режиме: механизированного мутника и тралов стандартной конструкции ГосНИ-ОРХ и обрабатывался стандартными методами [Правдин, 1966]. Материал для изучения питания окуня собран из траловых уловов пелагиали озера осенью 2019 г. и обработан по общепринятой методике [Методическое пособие..., 1974].

Известно, что рост любого организма теснейшим образом связан с обеспеченностью пищей и может варьировать в результате изменения кормовой базы популяции. Для выявления причин низкого темпа роста последних поколений окуня Чудского озера было изучено его питание. В выборку вошли рыбы размером 11,5–14,5 см (среднее 13,0), массой от 29 до 58 г (среднее 40 г), представители трех поколений: 2+, 3+ и 4+, среди которых доминировало поколение 2+.

Как показывают траловые уловы, численность сеголетков окуня в Чудском озере в период исследования колебалась в широких пределах. Наиболее урожайными были поколения 2015 и 2019 гг., поколения 2011, 2017 и 2018 гг. отличались низкой численностью (табл. 1).

Таблица 1. Средние уловы на усилие сеголетков окуня (экз.- трал/час) Чудского озера в 2011–2019 гг. научно-исследовательским тралом (размер ячеи сети 5–6 мм)

Годы	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Количество сеголетков экз.- трал/час	1,9	960,8	238,9	9,7	503 905	107,4	0	1,4	10 508

В результате проведенных исследований выявлено снижение темпа роста окуня в период 2011–2015 гг. Особенно замедленными темпами роста отличаются особи высокоурожайного поколения 2015 г. Расчеты удельной скорости роста окуня в период 2+ – 4+ лет по формуле И. И. Шмальгаузена и С. Броди (1927) [Козлов, Абрамович, 1982] показали снижение темпа его роста в последние годы. Наиболее показательное снижение скорости весового роста при сохранении скорости линейного (табл. 2).

Таблица 2. Удельная скорость роста окуня Чудского озера поколений 2011–2015 гг.

Год рождения поколения	Скорость роста	
	по длине	по массе
2011	0,16	0,51
2012	0,13	0,44
2013	0,15	0,42
2014	0,13	0,40
2015	0,13	0,36

Абсолютные размерно-массовые характеристики окуня из траловых уловов Чудского озера свидетельствуют о том, что наиболее тугорослым оказалось высокоурожайное поколение 2015 г. Длина и масса тела рыб младших возрастов (поколения 2016 и 2017 гг.) несколько выше, чем у рыб 2015 г., но не достигает уровня предыдущих лет (рис. 1, 2).

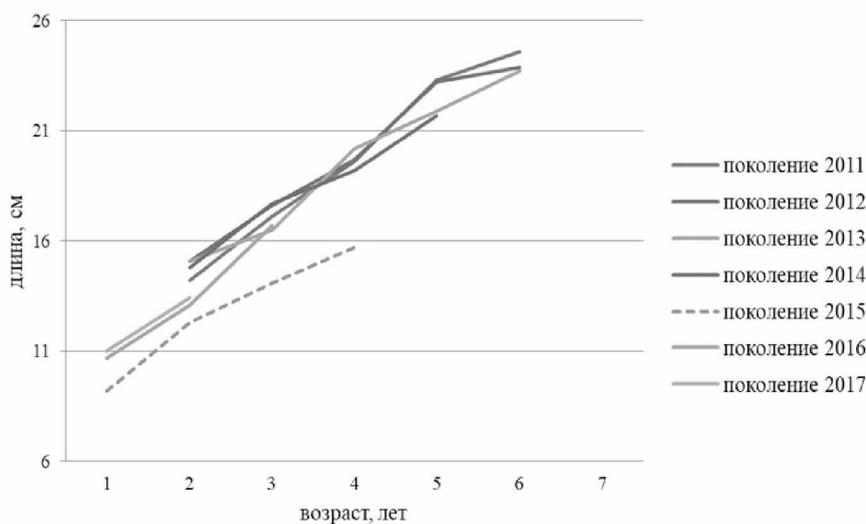


Рис. 1. Линейный рост окуня Чудского озера (поколения 2011–2017 гг.)

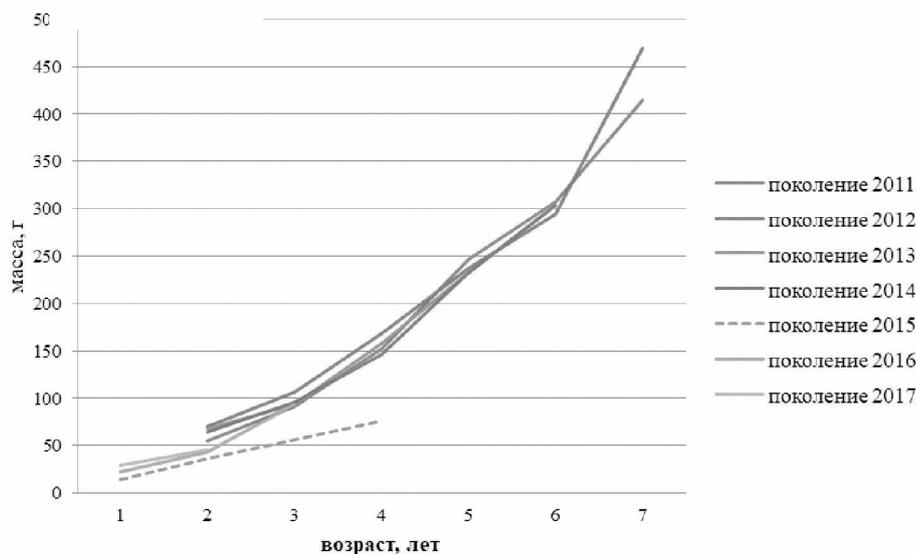


Рис. 2. Рост массы окуня Чудского озера (поколения 2011–2017 гг.)

Количество рыб с наполненными желудками составляло 80 % от объема выборки, в составе пищевого комка исследованных особей обнаружены исключительно зоопланктонные организмы, принадлежащие к 10 видам. Из них *Daphnia galeata* Sars, *Bosmina coregoni* Baird, *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller), *Limnosida frontosa* Sars, *Leptodora kandtii* (Focke), *Bythotrephes brevimanus* (Lilljeborg), *Eudiaptomus gracilis* Sars, *Cyclops* sp. являются типичными обитателями пелагиали водоема. Единично отмечены донные виды *Leudigia acantocercoides* (Fischer) и *Eurycercus lamellatus* (O. F. Müller).

По встречаемости и биомассе доминировала *Leptodora kandtii* (встречена в 95 % наполненных желудков) в количестве от 2 до более 200 экземпляров в одном желудке. Вторым по встречаемости был *Bythotrephes brevimanus* (60 %) в количестве от 1 до 20 экземпляров, довольно часто встречались мелкие ветвистоусые ракообразные *Bosmina coregoni* (31 %) и *Daphnia galeata* (26 %). Величина индекса наполнения желудков колебалась в широких пределах 0,8–118,3 ‰, что ниже величин, приведенных в исследованиях 1960–80-х гг.

В период исследования биомасса зоопланктона в пелагиали озера составляла более 1,5 г/м³, что характеризует кормовые условия как благоприятные. Однако в количественных пробах зоопланктона доминировали *Eudiaptomus gracilis*, *Chydorus sphaericus*, *Cyclops scutifer* Sars, численность *Leptodora kandtii* составляли всего лишь 20–25 экз./м³. Следовательно, очевидна определенная избирательность окуня в выборе пищевых объектов.

В желудках рыб длиной 15–18 см (возраст 4+ и старше) преобладала рыбная пища, снеток и ерш, реже сеголетки окуня. Более крупные старшевозрастные особи (19 см и более) в качестве кормового объекта предпочитали исключительно ерша.

Таким образом, в результате исследований выявлено, что окунь младших возрастов в Чудском озере в качестве основной пищи потребляет зоопланктон. Переход на рыбную пищу происходит не раньше трехлетнего возраста. Такие изменения в питании отразились на темпах роста популяции. Особенно тугорослым является поколение 2015 г., которое так и не перешло на полноценное питание рыбной пищей. Возможно, это произошло из-за его высокой численности и внутривидовой конкуренции.

Список литературы

Антипова Л. Ф., Концевая Н. Я. Суточная периодичность питания хищных рыб Псковского озера // Гидробиологические исследования внутренних водоемов Нечерноземной зоны России: сб. науч. трудов ГосНИОРХ. Вып. 328. СПб.: ГосНИОРХ, 1994. С. 50–57.

Дрозжина К. С. Питание окуня Ладожского озера // Питание и рост рыб в разнотипных водоемах: сб. науч. трудов ГосНИОРХ. Вып. 182. Л.: ГосНИОРХ, 1982. С. 94–108.

Козлов В. И., Абрамович Л. С. Краткий словарь рыбовода. М.: Россельхозиздат, 1982. 160 с.

Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях. М.: Наука, 1974. 254 с.

Пиху Э. Р., Пиху Э. Х. Окунь и ерш Псковско-Чудского водоема // Известия ГосНИОРХ. Т. 83. Научные основы рациональной эксплуатации рыбных запасов Псковско-Чудского водоема. Л., 1974. С. 111–130.

Пиху Э. Х., Пиху Э. Р. Питание основных хищных рыб Псковско-Чудского водоема // Известия ГосНИОРХ. Т. 83. Научные основы рациональной эксплуатации рыбных запасов Псковско-Чудского водоема. Л., 1974. С. 136–143.

Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб: (преимущественно пресноводных). М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.

Ширкова А. П. Окунь Псковско-Чудского водоема // Гидробиология и рыбное хозяйство Псковско-Чудского озера. Таллин: Валгус, 1966. С. 221–227.

CHANGES IN THE GROWTH RATE OF EARLY-AGE PERCH (*PERCA FLUVIATILIS* L.) IN LAKE PEIPUS

E. Pimeenko, A. Cherevichko

Pskov Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Pskov

The size and age composition and productivity of generations of perch (*Perca fluviatilis* L., 1758) in Lake Peipus were studied in the period 2011–2019. It is shown that a slowdown of the length and weight gain of perch fry in recent years is associated with a change in nutrition patterns. In particular, this involves a longer period of feeding on zooplankton and a delayed transition to fish foods. The composition of zooplankton organisms consumed by perch was determined, and younger fish were shown to selectively feed on large predatory cladocerans *Leptodora kandtii* (Focke) and *Bythotrephes brevimanus* (Lilljeborg).

ИЗУЧЕНИЕ СУТОЧНЫХ МИГРАЦИЙ ЗООПЛАНКТОНА В ШХЕРНОМ РАЙОНЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Н. В. Родионова¹, А. Д. Старухина², Д. С. Дудакова¹

¹ Институт озераедения РАН, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

За недельный период (с 6 по 11 августа 2019 г.) в шхерном районе Ладожского озера на станциях с глубинами 6 и 12 м исследованы суточные миграции четырех массовых групп ракообразных: *Bosmina* sp. и *Daphnia* sp. – из ветвистоусых и *Cyclopoida* sp. и *Calanoida* sp. – из веслоногих. Полученные результаты позволили показать наличие дневных перемещений этих групп на большую глубину и ночные перемещения их к поверхности, особенно хорошо выраженные у босмин. Проведена оценка влияния температурного фактора, погодных условий и фаз луны. Выявлена зависимость численности массовых групп зоопланктона от ветрового воздействия, а для дафний – также от облачности; влияния остальных факторов не отмечено.

Явления активных суточных миграций зоопланктона хорошо известны для морей [Виноградов, 1959; Анохина, 2006], отмечены они и в пресных водах [Семенченко, Разлуцкий, 2009]. Считается, что активные суточные вертикальные перемещения планктонных организмов играют приспособительную роль, целью которых может быть защита (избегание хищников), питание, поиск новых местообитаний, репродуктивные циклы и др. [Munshi et al., 1993; Burks et al., 2002; Семенченко, Разлуцкий, 2009]. Для зоопланктона Ладожского озера также отмечено наличие суточных миграций [Rakhola et al., 1999; Дудакова, Родионова, 2012; Дудакова и др., 2015].

Цель работы – выявить наличие и причины суточных миграций нескольких групп зоопланктонных ракообразных в мелководье шхерного района Ладожского озера.

Материалы и методы исследования

Исследования по изучению суточных миграций зоопланктона проводились в период с 6 по 11 августа 2019 г. на участке акватории Ладожского озера вблизи полуострова Хунукка в северном шхерном районе. Станции располагались по профилю протяженностью порядка 600 м от берега и находились на глубинах 3, 6, 9, 12 и 15 м, из них недельный ход суточных миграций изучался для двух станций – 6 и 12 м (рис. 1).

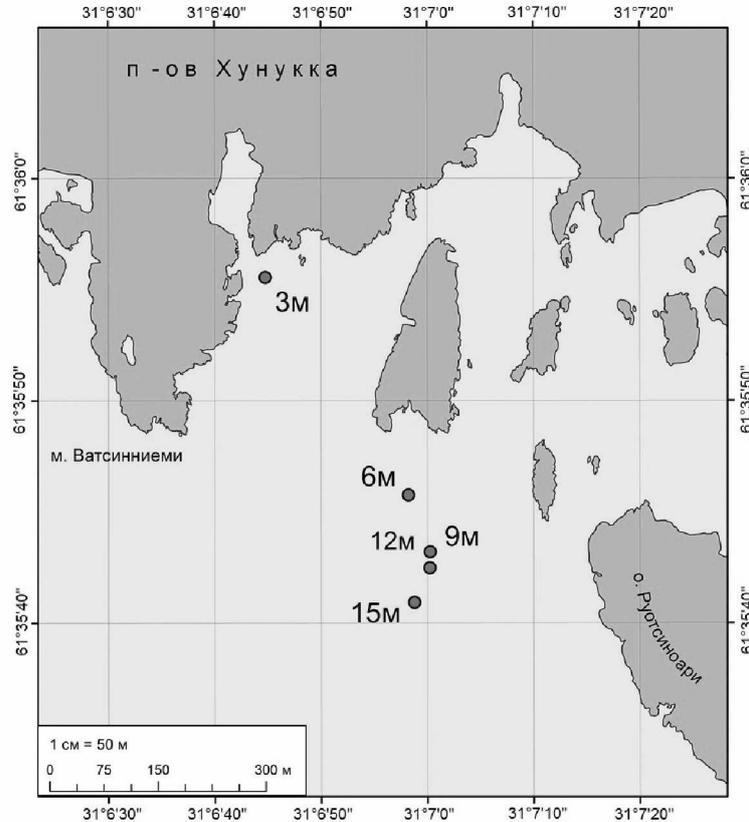


Рис. 1. Схема полигона исследований и расположения станций

Отбор проб зоопланктона проводили дважды в сутки: в астрономический полдень и полночь. Параллельно проводили измерения температуры термокосами (579 замеров с двух буйковых станций 6 м и 12 м) [Дудаков, Дудакова, 2020]. Пробы зоопланктона собирали малой сетью Джеди (диаметр кольца – 12 см, размер ячеек – 120 мкм), фиксировали 40 % формалином исходя из его конечной концентрации в пробе 4 %. Пробы отбирали протягиванием сети с трех горизонтов, на обеих станциях: всегда облавливался слой 0–2 м, далее на станции с глубиной 6 м: 2–4 м и 4–5,5 м; на станции с глубиной 12 м: 2–7 м и 7–11,5 м. Подсчет организмов проводили под бинокляром МБС-1. Объектами исследования были выбраны массово встречаемые виды: из ветвистоусых – *Daphnia* sp. и *Bosmina* sp. и из веслоногих – *Cyclops* sp. и *Calanoida* sp. Всего было проанализировано 60 количественных проб.

Для выявления суточных миграций использовали метод построения изопланкт, предложенных Г. И. Маркевичем [1980]. При построении изопланкт использовали программные средства Microsoft Excel.

В нашей работе применен следующий алгоритм расчетов и построения изопланкт.

1) Расчет a' : $a' = A/5$,

где a' – число процентных групп по 5 % изопланкте, приходящихся на один горизонт; A – процент особей на i горизонте, %;

2) Расчет y_i : $y_i = x_h / a'$,

где y_i – шаг прохождения изопланкт в горизонте, м; x_h – мощность горизонта, м;

3) Расчет c_{y_i} : $c_{y_i} = 0 + y_1 + \dots + y_i$,

где c_{y_i} – значения глубины прохождения соответствующей изопланкты.

Суммарное количество изопланкт составляло 20 (с учетом 5 % шага). Для каждого момента времени вычислялись значения c_{yi} , которые и вносились в таблицу Excel. На следующем этапе по полученному массиву производилось построение графика с глубинами по оси ординат и временем суток – по оси абсцисс.

Верхней границей ядра популяции считали глубину, выше которой расположено 25 % организмов от общей численности в столбе воды. За нижнюю границу ядра популяции в определенное время суток принимался горизонт, выше которого располагалось 75 % популяции [Маркевич, 1980].

Результаты и их обсуждение

Общие характеристики сообщества зоопланктонных ракообразных изучаемого участка акватории

Численность зоопланктона на обеих станциях была невысокой и составляла в среднем для всего периода наблюдений на ст. 1 (гл. 6 м) 851,2 экз./м³, а на ст. 2 (гл. 12 м) 442,5 экз./м³. В течение суток численность зоопланктона сильно колебалась. Ее диапазон составлял на ст. 1 от 69 до 2330 экз./м³, а на ст. 2 – от 92 до 1376 экз./м³. Максимальная концентрация зоопланктона на обеих станциях наблюдалась в полдень. Наибольшую роль среди планктонных ракообразных играли дафнии (от 18 до 51 % общей численности; в среднем – 34 %) и босмины (от 27 до 48 %; в среднем – 22 %). По 5–8 % численности занимали циклопы и каляниды.

Вертикальные миграции

Изопланкты, построенные для четырех групп ракообразных, позволили выявить наличие суточных миграций, характер которых не был однозначным для всех организмов. Имеется хорошая сходимость этих данных для станций с двух разных глубин (рис. 2). Особенно четко ход миграций был выражен для босмин, тогда как наименее четкие перемещения показывали каляниды. Более выражены миграции были на станции, расположенной на меньшей глубине ближе к берегу. Интересно исчезновение калянид с обеих исследованных станций и со всех горизонтов в полдень 10 августа в период, совпавший с началом сильного ветра.

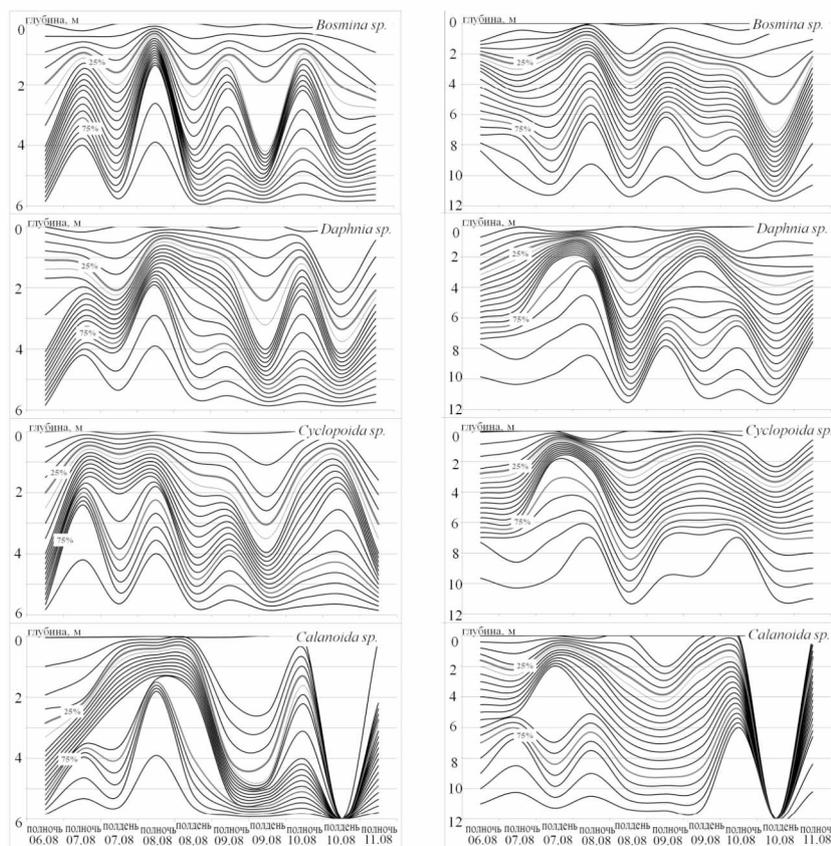


Рис. 2. Зоопланкты суточных изменений (полдень/полуночь) плотности массовых видов и групп зоопланктона на 6 м (левый ряд) и 12 м (правый ряд) за период с 6 по 11 августа 2019 г. на исследованном участке шхерного района Ладожского озера

Связь с температурой, погодными условиями и фазами Луны

За период исследований произошли достаточно сильные изменения температурного фронта: за неделю температуры воды на полигоне на исследованных глубинах поднялись от 3,9 до 9,7 °С (рис. 3). Однако такое изменение температур совершенно не отразилось на планктонном сообществе (табл.) и не влияло на ход суточных миграций. Отмечено лишь незначительное рассеивание мощности ядра популяции для босмин и циклопов с ростом температуры.

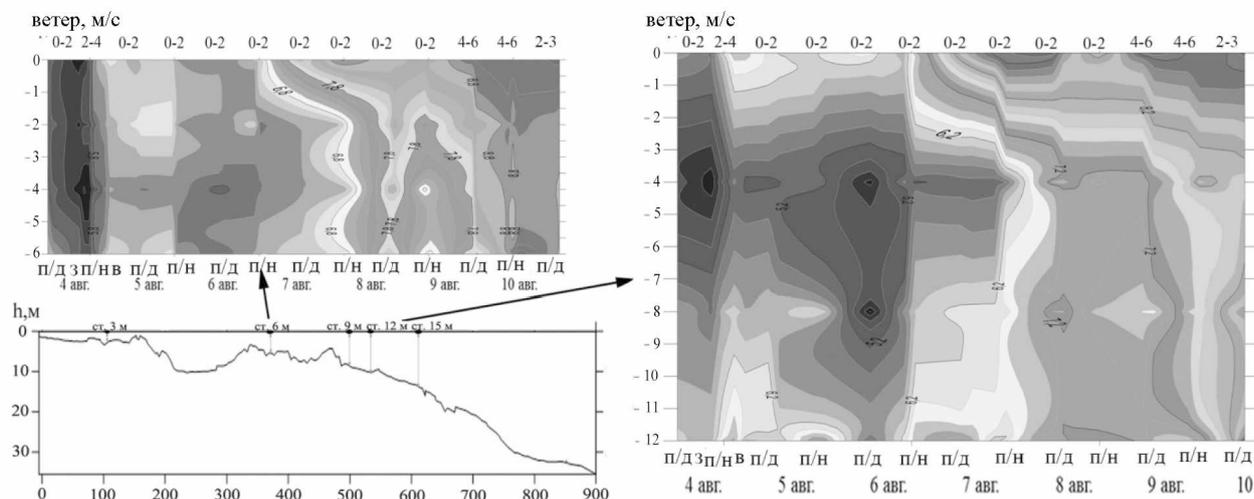


Рис. 3. Изменения температуры за недельный срок с 4 по 10 августа 2019 г. на двух станциях (6 м и 12 м) исследованного участка шхерного района Ладожского озера:

п/д – полдень, п/н – полночь, з – закат, в – восход

Наиболее высокой была зависимость всех массовых групп зоопланктона от силы ветра (табл.). С усилением силы ветра численность зоопланктона увеличивалась, что могло быть вызвано привнесом особей из открытой части акватории. Усиление ветрового воздействия способствовало большему рассеиванию в толще воды дафний, циклопов и калянид, тогда как босмины, напротив, создавали более концентрированные скопления в более узких горизонтах. Значимая положительная корреляция выявлена по зависимости численности дафний от облачности.

Корреляционные связи (R) между параметрами среды и численностью разных групп зоопланктона (* – значимые корреляции ($p < 0,05$))

Параметры среды	Группы зоопланктона				
	Циклопы	Каляниды	Дафнии	Босмины	Прочие
Температура	0,001	-0,022	0,149	-0,040	-0,003
Облачность	0,248	0,013	0,308*	0,155	0,219
Сила ветра	0,298*	0,273*	0,414*	0,314*	0,198
Фазы Луны	0,003	0,074	0,147	-0,037	0,041

Период исследований пришелся на растущую Луну, и даты относились к первой и второй лунной фазе (от 44 до 77 %). Корреляций между фазой Луны и численностью зоопланктона выявлено не было. Однако отмечено некоторое увеличение мощности горизонтов, занимаемых ядрами популяции исследуемых массовых видов с ростом Луны, что может быть связано с повышением ночной освещенности.

Таким образом, проведенная работа позволила показать наличие суточных миграций планктонных ракообразных, наиболее четко выраженных для босмин. Наиболее значимым фактором, влияющим на численность разных групп зоопланктона, была сила ветра, а для дафний – также облачности. Влияние прочих факторов было достаточно слабым.

Авторы выражают глубокую благодарность М. О. Дудакову за обеспечение технической части работ и В. М. Анохину, А. О. Аксенову, И. И. Андрееву, С. М. Дудакову, И. И. Мокину, И. А. Мухину, М. Д. Петуховой, Е. А. Фокиной – за участие в отборе зоопланктонных проб и частично их камеральную обработку.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Список литературы

- Анохина Л. Л. Влияние лунного света на вертикальные миграции бентопелагического планктона в прибрежье Черного моря // *Океанология*. 2006. Т. 46, № 3. С. 415–425.
- Виноградов М. Е. К вопросу о вертикальных группировках морского зоопланктона // *Труды ИОАН АН СССР*. 1959. Т. 30. С. 100–106.
- Дудаков М. О., Дудакова Д. С. Построение цифровой радиосети для сбора гидрологических данных на примере изучения суточной динамики температур прибрежных вод шхерного района Ладожского озера // *География: проблемы науки и образования: Материалы ежегодной Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч. LXXIII Герценовские чтения (Санкт-Петербург, РГПУ им. А. И. Герцена, 22–25 апреля 2020 г.)*. Т. 1. СПб.: Астерион, 2020. С. 291–296.
- Дудакова Д. С., Родионова Н. В. Суточные изменения озерного планктона и бентоса в литоральной зоне Ладожского озера перед штормом // *География: проблемы науки и образования: Материалы ежегодной Междунар. науч.-практ. конф. LXV Герценовские чтения (Санкт-Петербург, РГПУ им. А. И. Герцена, 19–21 апреля 2012 г.)*. СПб.: Астерион, 2012. С. 228–231.
- Дудакова Д. С., Родионова Н. В., Протопопова Е. В., Капустина Л. Л., Бардинский Д. С. Состав и динамика гидробионтов литорали бухты Петрокрепость Ладожского озера // *Труды Карельского научного центра РАН*, 2015. № 2. С. 53–70.
- Маркевич Г. И. К методике анализа суточных планктонных ловов // *Биология внутренних вод. Информационный бюллетень*. 1980. № 48. С. 71–74.
- Семенченко В. П., Разлуцкий В. И. Факторы, определяющие суточное распределение и перемещения зоопланктона в литоральной зоне пресноводных озер (обзор) // *Journal of Siberian Federal University. Biology*. N 2. С. 191–225.
- Burks R. L., Lodge D. M., Jeppesen E., Lauridsen T. L. Diel horizontal migration of zooplankton: costs and benefits of inhabiting the littoral // *Freshwater Biology*. 2002. Vol. 47. P. 343–365.
- Munshi J. D., Dutta H. M., Dutta G. R., Singh N. K., Singh C. B., Munshi J. S. Diel variations of certain physico-chemical factors and plankton population of chaur (wetland) of Kusheswarasthan (India) // *Acta Hydrobiol.* 1993. Vol. 35, N 1. P. 3–14.
- Rahkola M., Avinski V., Holopainen A.-L. et al. Inter-acting in the dark: a study of the diel vertical migrations of pelagic plankton and fish in Lake Ladoga // *Boreal environment research*. 1999. N 4. P. 245–255.

A STUDY OF ZOOPLANKTON DIEL MIGRATIONS IN THE SKERRIED REGION OF LAKE LADOGA

N. Rodionova¹, A. Starukhina², D. Dudakova¹

¹ Institute of Limnology RAS, St. Petersburg

² St. Petersburg State University, St. Petersburg

Diel migrations of four mass genera and groups of planktonic crustaceans (*Bosmina* sp., *Daphnia* sp., *Cyclopoidea* sp., *Calanoida* sp.) were studied in the skerried region of Lake Ladoga at sites with depths of 6 and 12 m. The results indicate that these groups move to a greater depth during the day and rise to the surface at night, which is especially well expressed in bosmids. The influence of the temperature factor, weather conditions and phases of the moon was evaluated. A correlation was found between the numbers of mass groups of zooplankton and the wind factor, and for *Daphnia* – also the cloud cover; while the influence of other factors was not observed.

ОЦЕНКА ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕР ВАЛААМСКОГО АРХИПЕЛАГА

В. О. Сергеева¹, Е. Ю. Воякина^{1,2}

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург

По данным наблюдений с июня по сентябрь 2017–2019 гг. определен трофический статус малых озер Валаамского архипелага (Лещевое, Симняховское и Витальевское). Для каждого озера по трем параметрам (прозрачность, содержание общего фосфора и концентрация хлорофилла «а») были рассчитаны индексы трофического статуса Карлсона (TSI). Согласно рассчитанным значениям индексов, Лещевое и Симняховское озера занимают промежуточный между мезотрофным и эвтрофным уровень, а Витальевское озеро – эвтрофный.

Трофический статус – это характеристика экологического состояния водного объекта, определяемая множеством взаимосвязанных физических, химических, биохимических и биологических процессов [Антонова, Севастьянов, 2004]. Его качественное и точное определение может служить предпосылкой для принятия своевременных водоохраных мер.

Существуют два способа определения трофности водоема – покомпонентный и многокритериальный [Дмитриев, 1997]. Второй способ оценки имеет два уровня – низкий и высокий. Первый связан с оценкой по отдельным группам классификационных параметров (гидрофизическим, гидрохимическим, гидробиологическим), второй же уровень оценки трофического статуса учитывает совокупность групп параметров [Сергеев, Лю, 2004]. Многие ученые сходятся во мнении, что для более точной и адекватной оценки трофности водного объекта необходимо комбинировать два или более параметров в один (индекс) для адекватной оценки трофического состояния водоема [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990; Дмитриев, 1997; Антонова, Севастьянов, 2004; Сергеев, Лю, 2004; Адамович и др., 2016].

В настоящее время существует множество индикаторов трофического состояния водных объектов. Так, в работе В. В. Дмитриева по литературным данным приводится список из 51 показателя трофности [Дмитриев, 1997]. Наиболее популярны для оценки трофического статуса следующие: концентрация биогенных веществ, скорость истощения кислорода в гипolimнионе (этот индикатор может применяться только для характеристики стратифицированных озер), прозрачность, первичная продукция фитопланктона, концентрация хлорофилла «а», морфометрические и гидрологические характеристики водного объекта.

Наиболее распространенный индекс трофического состояния – это индекс Карлсона (TSI). R. E. Carlson в своей работе отмечал, что основным показателем, характеризующим трофический статус водного объекта, служит биомасса фитопланктона [Carlson, 1977]. Классический вариант расчета индекса производится по трем параметрам – прозрачности, содержанию общего фосфора и концентрации хлорофилла «а».

Работа проводилась на Валаамском архипелаге, на территории которого расположены 11 внутренних озер. Озеро Лещевое – самое большое, связано через протоку с Ладожским озером и внутренним оз. Сисьярви. На его водосборной площади находятся сельскохозяйственные угодья, на которых в последние годы проводятся активные мелиоративные работы. Озера Симняховское и Витальевское относятся к группе малых лесных озер с переменным стоком и функционируют в естественном режиме. Исследуемые озера расположены в гумидной зоне, поэтому для них характерны высокие значения цветности воды. Так, по мониторинговым данным за период 1997–2008 гг., значения цветности воды на поверхности в Лещевом озере варьировали в диапазоне от 40 до 96 °Pt-Co шкалы, в Симняховском озере – в диапазоне от 70 до 172 °Pt-Co шкалы, в Витальевском озере – от 120 до 252 °Pt-Co шкалы [Степанова и др., 2010].

Цель работы – оценить трофический статус Лещевого, Симняховского и Витальевского озер Валаамского архипелага по трем параметрам с помощью индекса Карлсона (TSI) по данным за 2017–2019 гг.

В данной работе использован материал, полученный для трех озер, в ходе мониторинга водоемов Валаамского архипелага с 2017 по 2019 гг. Отбор проб производился один раз в месяц в период

с июня по сентябрь на мониторинговых станциях с максимальной глубиной. Определение прозрачности проводили с использованием белого диска диаметром 30 см. Содержание общего фосфора определяли общепринятыми методами [Алекин и др., 1973]. Фотосинтетические пигменты определяли стандартным спектрофотометрическим методом, концентрацию хлорофилла «а» рассчитывали по соответствующим формулам [Lorenzen, 1967].

Расчет индексов Карлсона производился по следующим формулам:

$$TSI(SD) = -14,388 \ln(SD) + 59,909, \quad (1)$$

$$TSI(TP) = 14,427 \ln(P_{\text{общ}}) + 4,1504, \quad (2)$$

$$TSI(\text{Chl-a}) = 9,7552 \ln(\text{Chl-a}) + 30,913, \quad (3)$$

где TSI(SD) – индекс трофического состояния, рассчитанный по значениям прозрачности, м; TSI(TP) – индекс трофического состояния, рассчитанный по содержанию общего фосфора, мкг/л; TSI(Chl-a) – индекс трофического состояния, рассчитанный по концентрации хлорофилла «а», мг/м³.

Исследуемые озера различаются по основным морфометрическим характеристикам (табл. 1). Озеро Лещевое – самое большое по площади водного зеркала и самое глубокое, а Симняховское и Витальевское озера – небольшие по площади и отличаются малой глубиной, поэтому прогрев воды в них происходит быстро и равномерно [Степанова и др., 2010].

Таблица 1. Значения основных морфометрических характеристик исследуемых озер [Степанова и др., 2010]

Название озера	Площадь водосбора, га	Максимальная глубина, м	Площадь водного зеркала, км ²
Лещевое	23,8	6,5	2,1
Симняховское	1,9	2,1	0,4
Витальевское	0,51	1,9	0,5

Озера Витальевское и Лещевое отличаются высокими значениями продукции органического вещества, тогда как Симняховское озеро минимальными, причем для Витальевского озера характерна заметная межгодовая динамика продукции органического вещества [Воякина, 2017].

В ходе работы были проанализированы данные по прозрачности (SD), содержанию общего фосфора (TP) и концентрации хлорофилла «а» (на поверхности (Chl-a (0)) и в интегральной пробе (Chl-a (инт))).

Озера различались по средним значениям исследуемых параметров, также для них установлены широкие диапазоны. В Лещевом и Симняховском озерах зафиксированы высокие значения прозрачности воды. Минимальная прозрачность отмечена в Витальевском озере, это, вероятно, связано с его местоположением и большой площадью заболоченного водосбора, что обуславливает высокие значения цветности воды (табл. 2).

Таблица 2. Средние и экстремальные значения анализируемых параметров в исследуемых озерах (июнь – сентябрь 2017–2019 гг.)

Параметры	Озеро Лещевое	Озеро Симняховское	Озеро Витальевское
SD, м	1,08 (0,80–1,20)	0,91 (0,70–1,10)	0,67 (0,45–0,90)
TP, мкг/л	14,69 (7,50–22,50)	13,00 (< порога обнаружения – 20,00)	29,25 (12,50–52,50)
Chl-a (0), мг/м ³	12,73 (2,97–40,59)	8,72 (1,09–22,80)	24,90 (1,61–181,52)
Chl-a (инт), мг/м ³	8,78 (1,09–22,80)	6,51 (2,65–13,62)	21,84 (3,28–64,95)

В трех озерах установлено высокое содержание общего фосфора. Максимальное значение было в августе 2018 г. в Витальевском озере (52,5 мкг/л), а в Симняховском озере в августе 2019 г. содержание общего фосфора было ниже порога обнаружения. Среди трех озер в Витальевском озере зафиксировано самое высокое содержание общего фосфора, что согласуется с низкой прозрачностью и высокими концентрациями хлорофилла «а».

В озерах средние за период исследования концентрации хлорофилла «а» на поверхности больше, чем в интегральной пробе. Для Лещевого озера наибольший диапазон концентрации хлорофилла «а» отмечен на поверхности, чем в интегральных пробах. Вероятно, это связано с относительно большой глубиной, благодаря чему фитопланктон активно вегетирует на поверхности, а не во всем столбе воды.

Несмотря на то, что озера Симняховское и Витальевское не сильно различаются по глубине, для них характерны большие различия в средних значениях исследуемых параметров. Так, Витальевское озеро отличается более низкой прозрачностью и высоким содержанием общего фосфора и концентрацией хлорофилла «а». Также оз. Витальевское выделяется широким диапазоном концентраций хлорофилла «а» как на поверхности, так и в интегральной пробе. Стоит отметить, что за исследуемый период максимальная концентрация хлорофилла «а» на поверхности в Витальевском озере отмечена один раз (20.09.2018 г.), что, вероятно, связано с характерной для данного озера осенней вспышкой вегетации рафидофитовых водорослей. В Симняховском озере заметной разницы между значениями средних концентраций хлорофилла «а» на поверхности и в интегральной пробе не выявлено, а вариабельность концентраций хлорофилла «а» на поверхности выше, чем в интегральной пробе.

По формулам (1–3) были рассчитаны индексы трофического статуса (TSI) для каждого из исследуемых параметров (табл. 3).

Таблица 3. Средние и экстремальные значения рассчитанных индексов трофического состояния для исследуемых озер (июнь – сентябрь 2017–2019 гг.)

Озеро	TSI(SD)	TSI(TP)	TSI(Chl-a(0))	TSI(Chl-a(инт))
Лещевое	59 (57–69)	42 (33–49)	53 (42–67)	50 (32–61)
Симняховское	61 (59–65)	42 (27–47)	50 (40–65)	48 (40–56)
Витальевское	66 (61–71)	51 (41–61)	52 (36–82)	58 (43–72)

Для трех озер установлены широкие диапазоны значений индексов TSI(TP), TSI(Chl-a(0)), TSI(Chl-a(инт)), что можно объяснить вариабельностью параметров, по которым они рассчитаны.

По данным табл. 3 установлены трофические статусы для исследуемых озер по средним значениям каждого из рассчитанных индексов. Для этого была использована шкала соответствия значений индекса трофического состояния и трофического уровня [Carlson, 1977].

Наиболее высокий трофический статус трех исследуемых озер показывает индекс TSI(SD). Вероятно, это связано с высокой цветностью вод озер.

Лещевое и Симняховское озера по значениям TSI(Chl-a) занимают промежуточное положение между мезотрофным и эвтрофным уровнями. Среди трех озер наиболее высокий трофический статус установлен для Витальевского озера – эвтрофный по всем трем индексам.

В результате оценки трофического статуса по среднему трех индексов Лещевое и Симняховское озера занимают промежуточное положение между мезотрофным и эвтрофным уровнями, а Витальевское озеро – эвтрофное.

Можно сказать, что установленные трофические уровни для исследуемых озер не отличаются от рассчитанных ранее индексов трофического состояния (ИТС) по методике Бульона по данным за период с июня по сентябрь 1998–2014 гг. [Воякина, 2017]. В соответствии со значениями ИТС, Лещевое и Симняховское озера занимали мезотрофный уровень с чертами эвтрофии, а Витальевское озеро – эвтрофный. Таким образом, индекс Карлсона адекватно оценивает трофический уровень трех Валаамских озер.

Список литературы

- Адамович Б. В., Жукова Т. В., Михеева Т. М., Ковалевская Р. З., Лукьянова Е. В. Многолетние изменения индекса трофического состояния Нарочанских озер и его связь с основными гидроэкологическими параметрами // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 5. С. 535–543.
- Алекин О. А., Семенов А. Д., Скотинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
- Антонова Р. В., Севастьянов Д. В. К вопросу о влиянии морфометрических характеристик озер и их водосборов на трофический статус водоемов // Вестник СПбГУ. 2004. Сер. 7, вып. 1. С. 83–86.
- Воякина Е. Ю. Особенности продукционных процессов в озерах Валаамского архипелага // Труды Зоологического института РАН. 2017. Т. 321, № 1. С. 10–18.

Дмитриев В. В. Многокритериальная оценка состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей // Вестник СПбГУ. 1997. Т. 2, № 1. С. 51–67.

Сергеев Ю. Н., Лю Сулин. Цифровые модели трофического статуса и качества вод моря Бохай. II. Многокритериальная оценка трофности и качества вод // Вестник СПбГУ. 2004. Сер. 7, вып. 4. С. 53–63.

Степанова А. Б., Шарафутдинова Г. Ф., Воякина Е. Ю. Гидрохимические особенности малых озер о. Валаам // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 12. С. 97–110.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.

Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22, N 22. P. 361–369.

Lorenzen C. F. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations // *Limnology and Oceanography*. 1967. Vol. 12, N 2. P. 343–346.

ASSESSMENT OF THE TROPHIC STATUS OF LAKES IN VALAAM ARCHIPELAGO

V. Sergeeva¹, E. Voyakina^{1,2}

¹ Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

² Saint Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS, St. Petersburg

Based on observations from June to September 2017–2019, the trophic status of Valaam archipelago's small lakes (Leshchevoye, Simnyakhovskoye, and Vitalyevskoye) was determined. Carlson's trophic state index (TSI) was calculated for each lake using three parameters (transparency, total phosphorus, chlorophyll «a»). According to the calculated values of the index, Lakes Leshchevoye and Simnyakhovskoye occupy an intermediate position between mesotrophic and eutrophic, and Lake Vitalyevskoye is eutrophic.

ДИНАМИКА ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВОДОЕМОВ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «БРАСЛАВСКИЕ ОЗЕРА» В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И РЕЖИМА ОХРАНЫ

Н. Ю. Суховило, А. А. Куксовский, Д. Б. Власова

Белорусский государственный университет, Минск

В статье рассмотрены особенности распространения и видовой состав высшей водной растительности 9 озер национального парка «Браславские озера», описан опыт ее картирования с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Выявлена тенденция к увеличению площади зарастания четырех модельных озер, обусловленная созданием национального парка и улучшением качества воды. В двух водоемах отмечена деградация водной растительности, вызванная поступлением загрязняющих веществ. Полученные результаты могут использоваться для управления водными экосистемами, выявления негативных изменений в них, проведения восстановительных мероприятий, в рекреационных целях.

Высшая водная растительность является неотъемлемой частью озерных экосистем и индикатором изменения их экологического состояния и качества воды. Вместе с фитопланктоном она обеспечивает продукцию последующих звеньев пищевой цепи. Макрофиты влияют на физические свойства и химический состав воды, являясь естественным барьером для загрязняющих веществ, поступающих с водосборов, и препятствуя тем самым их распространению в водной массе. Поэтому их изучение важно для своевременного реагирования на изменение экологической ситуации в водоемах и предотвращения деградации водных экосистем.

Исследованию водной растительности озер Беларуси посвящены работы О. Ф. Якушко, Г. С. Гигевич, Б. П. Власова, С. Э. Латышева и др. Основой настоящего исследования послужило полевое обследование озер НИЛ озераведения факультета географии и геоинформатики БГУ.

Целью работы являлся анализ динамики высшей водной растительности озер национального парка «Браславские озера» с использованием данных дистанционного зондирования Земли для обоснования и реализации мер по снижению уровня деградации водоемов.

Объектами исследования стали 9 разнотипных водоемов, обследованных в августе 2019 г. Это озера Береже, Болта, Ельно, Дривяты, Свяццо, Новято, Рака, Снуды, Струсто. Они расположены в бассейне реки Друйки – притока Западной Двины и входят в состав Браславской группы озер. Площади водной поверхности изменяются от 0,29 км² у оз. Свяццо до 36,1 км² у оз. Дривяты. Котловины водоемов относятся к ложбинному (Рака), подпрудному (Дривяты, Береже, Новято, Свяццо), сложному (Снуды, Струсто) и термокарстовому (Болта, Ельно) типам [Власов, 2004]. Из-за различий в происхождении и строении котловин водоемы обладают различными морфометрическими характеристиками. Максимальные глубины в озерах Болта и Свяццо составляют 4,1 м, в оз. Снуды – 26,5 м [Якушко, 1981; Власов, 2004], прозрачность в летний период – от 0,3 (Свяццо) до 6,6 (Струсто) м. Трофический статус исследуемых озер варьируется от мезотрофного (Снуды, Струсто) до высокоэвтрофного и гипертрофного (Свяццо, Новято). Под воздействием всего комплекса описанных факторов в озерах создаются определенные условия формирования высшей водной растительности.

Оконтуривание границ произрастания надводных макрофитов и растений с плавающими листьями осуществлялось с помощью программы ArcMap 10.4.1. В качестве подложки использовалась базовая карта ArcMap. Для отработки методики картирования высшей водной растительности озер НП «Браславские озера», выявления основных дешифровочных признаков высшей водной растительности акватории озер был выполнен анализ результатов полевого обследования и дешифрирования космических снимков. В ходе полевого обследования полученные контуры уточнялись, так как в случае наличия разреженных зарослей камыша озерного или растений с плавающими листьями их идентификация на снимке невозможна. На этом же этапе с помощью эхолота и «кошки» определялись глубина распространения погруженных растений и их видовой состав.

При полевом обследовании было выявлено, что в надводном ярусе доминирующим видом является тростник южный (*Phragmites australis* Trin. ex Steud.), который встречается во всех озерах. Ширина его полосы колеблется от 1 до 300 м. Менее распространены камыш озерный (*Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla), стрелолист стрелолистный (*Sagittaria sagittifolia* L.), рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.) и др. Площадь, занятая надводными макрофитами, изменяется от 6,6 (оз. Дривяты) до 21 % (оз. Струсто) площади озера и определяется шириной литорали, характером донных отложений и экспозицией берегов относительно направления преобладающих ветров. В многолетнем разрезе она относительно стабильна, но имеется тенденция к ее увеличению за счет снижения антропогенной нагрузки после создания национального парка и снижения средней скорости ветра. В настоящее время глубина распространения надводных растений изменяется от 0,5 м на оз. Дривяты до 2–2,2 м в озерах Струсто и Рака.

Растения с плавающими листьями представлены кубышкой желтой (*Nuphar lutea* L.), кувшинками (*Nymphaea* sp.), рдестом плавающим (*Potamogeton natans* L.) и распространяются до глубины 2,2–2,5 м. Максимальная зафиксированная глубина распространения кубышки желтой отмечена в оз. Рака и составила 3,0 м. Площади, занятые растениями с плавающими листьями, колеблются от незначительных в оз. Снуды до 29,6 % водной поверхности в мелководном оз. Ельно. Озеро Ельно является единственным из обследованных водоемов, где растения с плавающими листьями доминируют над погруженными, что иллюстрирует рис. 1.

Максимальной площадью распространения, а также видовым разнообразием отличаются погруженные растения. Наибольшей ширины их полоса достигает в озерах Струсто и Снуды, характеризующихся большой площадью мелководий и высокой прозрачностью. В видовом составе доминируют роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum* L.), телорез алоэвидный (*Stratiotes aloides* L.), рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.), рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.), элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.), пузырчатка обыкновенная (*Utricularia vulgaris* L.), уруть колосистая (*Myriophyllum spicatum* L.), а также харовые водоросли (*Chara* sp.), не являющиеся представителями высшей водной растительности, однако имеющие широкое распространение в исследуемых озерах. Редко отмечается шелковник жестколистный

(*Ranunculus circinatus* Sibth.), уруть мутовчатая (*Myriophyllum verticillatum* L.) и рдест Фриса (*Potamogeton friesii* Rupr.), являющийся типичным эвтрофентом наряду с элодеей канадской. Охраняемые виды отмечены в двух озерах. В оз. Дривяты произрастают наяда (*Najas* sp.) и харовая водоросль нителлописис притупленный (*Nitellopsis obtusa* (A. N. Desvaux) J. Groves), в оз. Болта обнаружена гидрилла мутовчатая (*Hydrilla verticillata* L. Fil.).



Рис. 1. Надводные растения и растения с плавающими листьями в оз. Ельно

Общая глубина произрастания погруженных макрофитов меняется от 1,5 м в мелководном гиперэвтрофном оз. Новято до 7 м в оз. Струсто, площади – от 15,5 % площади оз. Болта до 60,0 % оз. Снуды. В оз. Святоце ввиду низкой прозрачности погруженная растительность полностью отсутствует, а ведущая роль в формировании первичной продукции принадлежит фитопланктону. Схемы зарастания озер Рака и Болта, где сформированы все три пояса макрофитов, приведены на рис. 2, 3.

Как видно из рисунков, надводные растения в водоемах формируют почти сплошной пояс, растения с плавающими листьями представлены фрагментарно по краю надводных, достигая глубины 2,2–3 м. Погруженные растения распространены повсеместно. В оз. Болта их распространение ограничено изобатой 2 м. Характер донных отложений препятствует более широкому развитию высшей водной растительности. В оз. Рака лимитирующими факторами являются морфология котловины и в меньшей степени прозрачность воды.

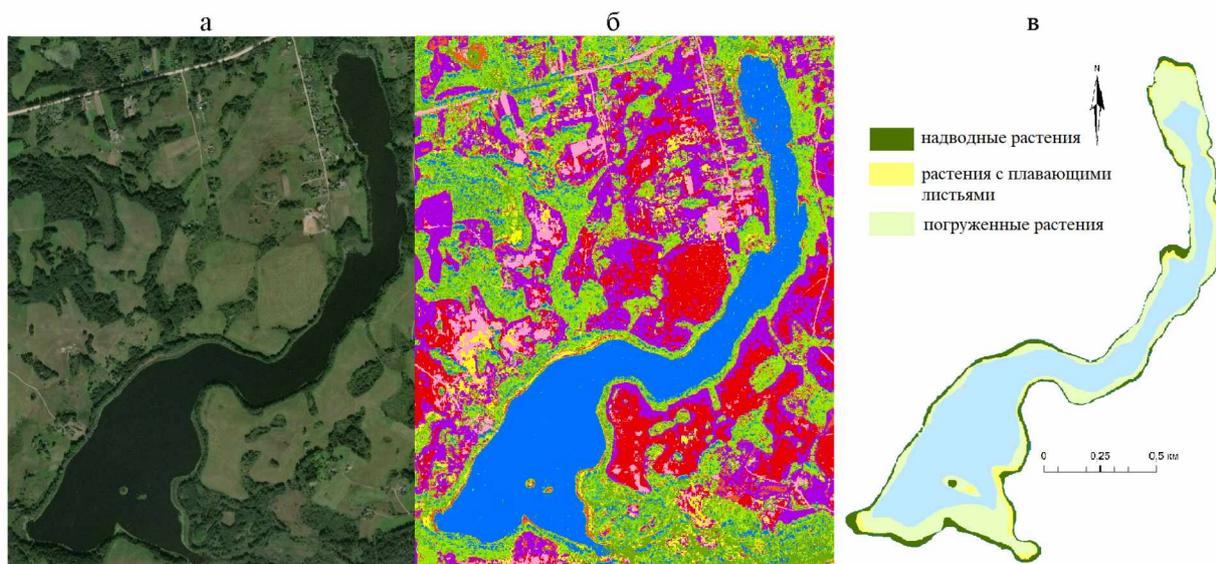


Рис. 2. Мультиспектральный (а) и классифицированный (б) снимки, схема зарастания (в) оз. Рака

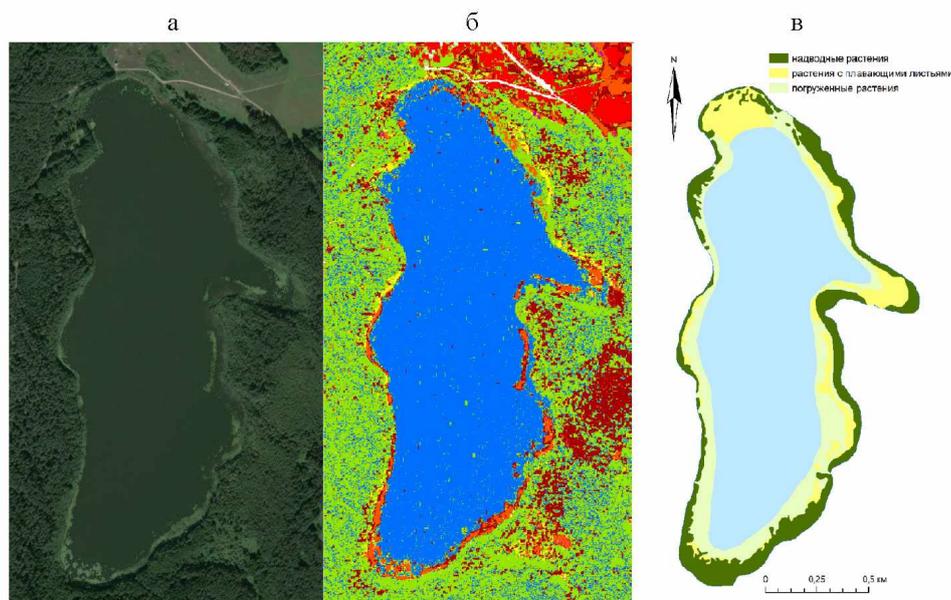


Рис. 3. Мультиспектральный (а) и классифицированный (б) снимки, схема зарастания (в) оз. Болта

В динамике высшей водной растительности обследованных озер можно выявить следующие особенности. В большинстве водоемов возросли площадь, занятая макрофитами, и глубина их распространения. Особенно это заметно на примере озер Струсто, Береже и Снуды, которые в настоящее время зарастают на 59,9–72,5 % своей площади, в то время как в 1970-х гг. она не превышала 40–65 %. Также следует отметить оз. Рака, где глубина распространения макрофитов возросла с 3 до 4,5 м, однако из-за крутых склонов котловины общая площадь зарастания озера не превышает 43 %. Во многом этому способствовало увеличение прозрачности, которое отмечается после создания в 1999 г. национального парка. Это повлекло за собой снижение количества загрязняющих веществ, поступающих в озеро, о чем свидетельствует гидрохимический анализ проб воды. Незначительное сокращение площади зарастания на фоне снижения прозрачности происходит в оз. Болта [Оценить..., 2019].

На основании полученных результатов было выявлено, что за период, прошедший с момента первого обследования водной растительности (38–47 лет), площади зарастания значительно увеличились в озерах Рака, Береже, Снуды, Струсто. Наиболее широко макрофиты распространены в озерах Струсто, Снуды, Береже. Этому способствовало создание в 1995 г. национального парка «Браславские озера». Площади зарастания озер Дривяты, Болта, Ельно не изменились, однако в видовом составе растительности оз. Болта впервые зафиксирован охраняемый вид. В оз. Свяццо наблюдается деградация водной растительности, чему способствуют низкая прозрачность и высокая цветность, связанная с развитием фитопланктона вследствие поступления биогенных элементов от локальных источников загрязнения.

Полученные результаты могут использоваться для управления водными экосистемами, выявления негативных изменений в них, проведения восстановительных мероприятий, в рекреационных целях и рыбохозяйственных организациях.

Работа выполнена в рамках НИР «Оценить современное состояние и разработать мероприятия по снижению уровня деградации водоемов национального парка "Браславские озера"» мероприятия 26 «Оценка современного состояния и реализация мер по снижению уровня деградации водоемов, расположенных на территории национальных парков "Нарочанский" и "Браславские озера"» (п. 26.1 – НП "Браславские озера") подпрограммы 4 «Сохранение и устойчивое использование биологического и ландшафтного разнообразия» государственной программы «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2016–2020 гг.

Список литературы

- Власов Б. П. Озера Беларуси: справочник. Минск: РУП «Минсктиппроект», 2004. 284 с.
 Оценить современное состояние и разработать мероприятия по снижению уровня деградации водоемов национального парка «Браславские озера»: отчет о НИР (промежут.). Минск, 2019. 190 с. № ГР 20180485.
 Якушко О. Ф. Озероведение. География озер Беларуси. Минск: Высшая школа, 1981. 223 с.

ALTERATION OF THE HIGHER AQUATIC VEGETATION IN WATERS OF THE BRASLAV LAKES NATIONAL PARK UNDER CHANGES IN THE NATURAL ENVIRONMENT AND PROTECTION REGULATIONS

N. Sukhovilo, A. Kuksovsky, D. Vlasova

Belarusian State University, Minsk

The article describes the distribution and species composition of higher aquatic vegetation in 9 lakes of the Braslav Lakes National Park. The experience of its mapping using remote sensing data is described. A tendency for an expansion of overgrown area was detected in four model lakes, due to the foundation of the national park and improved water quality. In two lakes, degradation of aquatic vegetation caused by the influx of pollutants was noted. The results can be used to restore and manage aquatic ecosystems, to identify negative changes in them, as well as for recreational purposes.

ОСЕННЕЕ ЦВЕТЕНИЕ ВОДЫ В ОЗЕРЕ СВЯТОЗЕРО В 2019 г.

В. С. Федорова

*Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

Представлен сравнительный анализ показателей фитопланктона в разные годы исследования озера Святозеро (1950–2013 гг.). Была выполнена оценка состояния экосистемы озера и влияния на нее антропогенных факторов. В сентябре 2019 г. проведено современное исследование «пятна цветения» в северной части озера Святозеро. Было показано повышение уровня трофии в водоеме вследствие массового развития сине-зеленых водорослей. По биомассе фитопланктона вода характеризовалась сильной степенью загрязненности. Озеро Святозеро соответствовало β -эвтрофным водоемам.

Эвтрофирование в настоящее время относится к одной из глобальных проблем, так как способствует необратимому изменению среды обитания, являясь серьезной угрозой для водных экосистем [Glibert et al., 2005]. Эвтрофирование (эвтрофикация, эвтрофия) водоемов связано с повышением биологической продуктивности в результате накопления биогенных элементов в воде и донных отложениях под действием как естественных, так и антропогенных факторов [Хрисанов, Голубков, 1993]. При данном процессе нарушается энергетический баланс озера, что приводит к изменению структуры сообщества гидробионтов, видового состава, сокращению звеньев пищевой цепи [Алимов, Осипов, 2014].

Эвтрофикация может происходить естественным образом, в пределах геологических периодов времени, поскольку озера стареют и постепенно заполняются терригенным материалом и биогенными элементами, поступающими с водосборной площади. Со временем в озере происходит уменьшение глубины. Озеро зарастает, литоральная растительность начинает распространяться на ранее открытые участки водной поверхности. Озеро становится мезотрофным (средняя стадия) и в конце концов – эвтрофным («старым»). Таким образом, озеро преобразуется в болото и в конечном итоге в наземную экосистему [Хендерсон-Селлерс, Марклэнд, 1990].

Однако деятельность человека ускорила темпы и масштабы эвтрофикации как за счет точечных сбросов (сосредоточенных в одном месте), так и за счет неточечных нагрузок (рассеянных по обширным территориям). При антропогенной эвтрофикации в водоемах возрастает концентрация лимитирующих питательных веществ, таких, как азот и фосфор. Данный процесс приводит к драматическим последствиям для источников питьевой воды, рыболовства и для водных объектов рекреационного назначения [Науменко, 2007]. Сложность этого явления заключается в невозможности

повернуть назад уже начавшийся процесс. Восстановить озеро чрезвычайно сложно, так как процесс эвтрофирования является следствием хозяйственной деятельности человека не только на самом водоеме, но и на его водосборе [Науменко, 2007].

Одним из самых известных явлений антропогенной эвтрофикации является массовое развитие фитопланктона («цветение воды»). Чрезмерный рост водорослей происходит из-за повышения в воде концентрации лимитирующих веществ. Главными последствиями «цветения» являются ухудшение качества питьевой воды, снижение ее прозрачности, уменьшение или отсутствие растворенного в воде кислорода («заморы рыб»), а также снижение рекреационных возможностей [Chislock et al., 2013]. Кроме того, одним из опасных последствий является развитие сине-зеленых водорослей, или цианобактерий (*Cyanophyceae*), которые способны выделять в окружающую среду опасные токсины как для человека, так и для животных. Наиболее известными и хорошо изученными представителями сине-зеленых водорослей, которые вызывают «цветение» воды, являются: *Microcystis*, *Planktothrix*, *Anabaena*, *Aphanizomenon* [Русских и др., 2012].

В настоящее время «цветут» практически все водоемы Северо-Запада России [Русских и др., 2012], в том числе водоемы Республики Карелия. В геологическом отношении водоемы Карелии являются «молодыми» [Озера Карелии, 2013], в основном олиготрофными, содержащими небольшое количество биогенных веществ, которые способны поддерживать только низкий уровень биомассы [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990]. Вследствие этого «цветение воды» наблюдается в водоемах Карелии только в результате хозяйственной деятельности человека (антропогенное эвтрофирование).

Так, в сентябре 2019 г. на оз. Святозеро (61°32' с. ш., 33°35' в. д.) наблюдалось массовое «цветение» фитопланктона. Целью нашего исследования стало изучение данного явления и выявление его возможных причин. Пробы были отобраны в самом «пятне цветения», в северной части озера, которое образовалось в результате нагонных ветров, вблизи пос. Святозеро. Прозрачность воды составляла 0,5 м, во время отбора проб отмечали запах гниющей растительности. Обработку проб осуществляли в соответствии с общепринятыми методами [Методика изучения..., 1975]. К ультрапланктонной фракции отнесены водоросли размером < 10 мкм, к нанопланктонной фракции фитопланктона отнесены водоросли размером 10–30 мкм, а более крупные водоросли – к микропланктонной [Михеева и др., 1998]. Индикаторную значимость видов фитопланктона и оценку качества воды определяли по методике [Барина и др., 2006]. Индексы сапробности рассчитывали по методу Пантле и Букка в модификации Сладечека [Sladecsek, 1973].

Многоплановое освоение человеком природных ресурсов водосбора оз. Святозеро отрицательно отразилось на его гидрохимическом и гидробиологическом режиме [Ильмаст и др., 2008]. Озеро является приемником коммунально-бытовых сточных вод пос. Святозеро, а также источником его водоснабжения, любительского рыболовства местных жителей [Озера Карелии, 2013]. Озеро расположено в средней части водосбора р. Шуи (бассейн Балтийского моря). Водоем является слабопроточным, хорошо прогреваемым, с прозрачностью воды 2–2,3 м [Александров и др., 1959]. Озеро Святозеро имеет небольшую площадь зеркала (9,9 км²), площадь водосбора составляет (40,6 км²), оно является мелководным (средняя глубина 6,8 м), олигогумусным водоемом (16° Pt-Co шкалы) со слабокислой или нейтральной реакцией среды (рН 6,2–7,6, в среднем 6,9), а также невысокой степенью минерализации ($\Sigma_{\text{и}} = 28,7$ мг/л) [Сабылина и др., 1998; Озера Карелии, 2013].

Первые фрагментарные исследования фитопланктона были выполнены в 1950-е гг. [Александров и др., 1959]. В тот период на территории водосбора было много сельскохозяйственных угодий и звероферм, озеро являлось источником их водоснабжения и приемником сточных вод [Озера Карелии, 2013]. Вследствие этого оз. Святозеро было одним из самых загрязненных водоемов Карелии и по показателям продуктивности являлось эвтрофным [Александров и др., 1959].

В 1990-е и начале 2000-х гг. были выполнены однократные, но более подробные исследования планктонных сообществ. Их сравнительная характеристика представлена в табл. 1, 2.

За период исследования (1994–2013 гг.) по уровню сапробности озеро варьировало от β -мезосапробного к α -олигосапробному уровню. Класс качества воды по биомассе фитопланктона изменялся от «чистой» к «удовлетворительно чистой». На момент исследования (лето 1994 г.) по показателям биомассы данный водоем относился к олиготрофным водоемам [Чекрыжева, 1998].

Возможно, это связано с резким спадом антропогенной нагрузки, так как в 1990-е гг. сельскохозяйственные производства, ранее существовавшие на водосборе водоема, стали закрываться. В дальнейшем, летом 2006 и 2013 гг., оз. Святозеро стали относить к α -мезотрофным водоемам [Ильмаст и др., 2008; Чекрыжева, Рыжков, 2014]. Повышение трофности в этот период можно связать с появлением товарного рыбоводства (форелевые садковые хозяйства), которое оказывает непосредственное влияние на усиление эвтрофирования водоема и снижение качества воды [Ильмаст и др., 2008].

Таблица 1. Сравнительная характеристика показателей развития фитопланктона оз. Святозеро в разные годы исследования

Год исследования	Сезон	Количественные показатели				Автор
		Средняя числ. (тыс.кл./л)	Средняя биомасса (г/м ³)	Количество таксонов рангом ниже рода	Группы водорослей (по биомассе)	
1994	Лето	430	0,8	54	Диатомовые (63 %) Эвгленовые (24 %) Зеленые (6 %) Пирофитовые (4 %) Золотистые (1,5 %) Сине-зеленые (1,5 %)	Чекрыжева, 1998
2006	Лето	315	1,575	16	Диатомовые (37 %) Пирофитовые (26 %) Сине-зеленые (20 %)	Ильмаст и др., 2008
2013	Лето	1 365	1,435	64	Динофитовые (51 %) Диатомовые (29 %) Сине-зеленые (13 %) Другие (7 %)	Чекрыжева, Рыжков, 2014

Таблица 2. Доминирующие виды фитопланктона и качество воды оз. Святозеро в разные годы исследования озера

Год исследования	Массовые виды и рода	Сапробность водоема (индекс сапробности)	Класс качества воды (по биомассе)	Автор
1994	<i>Aulacosira</i> , <i>Melosira</i> и <i>Cyclotella</i> , <i>Trachelomonas volvocina</i>	в-мезасапробный (1,8)	Чистая	Чекрыжева, 1998
2006	<i>Fragilaria crotonensis</i> , <i>Aulacosira islandica</i> , <i>Aulacosira italic var. tenissima</i> , <i>Stephanodiscus</i> <i>Astraea</i> , <i>Staurastrum oxyacanthum</i> , <i>Scenedesmus</i> <i>arcuatus</i> , <i>Gleocapsa turgid</i> , <i>Ceratium hirundinella</i>	α -олигосапробный (1,47)	Удовлетворительно чистая	Ильмаст и др., 2008
2013	<i>Aulacoseira</i> , <i>Tabellaria</i> , <i>Fragilaria</i> , <i>Cyclotella</i> , <i>Cosmarium</i> , <i>Elakatotrix</i> , <i>Monoraphidium</i> , <i>Chrysococcus</i> , <i>Kephyrion</i> , <i>Mallomonas</i> , <i>Ceratium</i> , <i>Peridinium</i> , <i>Peridiniopsis</i> , <i>Chroomonas</i> , <i>Cryptomonas</i> , <i>Rhodomonas</i> , <i>Trachelomonas</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Microcystis</i> , <i>Snowella</i> , <i>Woronichinia</i>	в-мезасапробный (2,3)	Удовлетворительно чистая	Чекрыжева, Рыжков, 2014

В ходе исследований в сентябре 2019 г. были получены данные о показателях развития и структуре фитопланктона в северной части оз. Святозеро. В составе фитопланктона выявлено 17 таксонов водорослей рангом ниже рода, из которых 14 видов представляли цианобактерии (99,8 % от общей биомассы и 96,7 % от общей численности) и по одному виду были отнесены к диатомовым, зеленым и эвгленовым водорослям. Доминантными видами являлись – *Microcystis wesenbergii*, *Microcystis aeruginosa*, *Woronichinia naegeliana*, *Microcystis flos-aqua*. Практически все виды относились к мелкоразмерной фракции (нанофитопланктону). Только один вид диатомовых водорослей относится к крупноразмерной фракции (микрофитопланктон). Индекс видового разнообразия Шеннона, который характеризует степень сложности структуры фитоценоза, составлял 2,8.

Осенью 2019 г. общая численность фитопланктона составляла 198 712,5 тыс. кл./л, а общая биомасса – 14,945 мг/л. По показателю биомассы фитопланктона вода характеризовалась сильной степенью загрязненности [Оксиюк и др., 1993], а водоем относился к β -эвтрофным [Китаев, 2007].

По индексу сапробности (1,7) вода оз. Святозеро в период исследования была оценена как удовлетворительно чистая (β -мезосапробная зона) [Оксиюк и др., 1993].

Таким образом, исследования 2019 г. позволили выявить экстремально высокие количественные показатели развития фитопланктона оз. Святозеро по сравнению с данными предыдущих лет. Трофность оз. Святозеро значительно возросла, качество воды заметно ухудшилось вследствие массового развития сине-зеленых водорослей. В связи с низкой антропогенной нагрузкой на озеро в современный период «цветение» воды в сентябре 2019 г. скорее всего связано с вторичным загрязнением водоема. Низкий уровень воды и интенсивные ветра способствовали поступлению из донных отложений биогенных веществ, накопившихся на дне в предшествующий период, когда антропогенная нагрузка на озеро была высока. Кроме того, в июле 2019 г. выпало большое количество осадков, в результате чего могло произойти смывание биогенных веществ с территории сельскохозяйственных угодий. Дополнительными благоприятными условиями для «цветения» воды оз. Святозеро в сентябре 2019 г. послужила теплая погода.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-44-100007.

Список литературы

- Александров Б. М., Беляева К. И., Покровский В. В.* Озеро Святозеро // Озера Карелии. Петрозаводск, 1959. С. 211–225.
- Алимов А. Ф., Голубков М. С.* Эвтрофирование водоемов и структура сообщества гидробионтов // Биология внутренних вод. 2014. № 3. С. 5–11.
- Барينوва С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 498 с.
- Ильмаст Н. В., Китаев С. П., Кучко В. Я., Павловский С. А.* Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 92 с.
- Китаев С. П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов.* М.: Наука, 1975. 250 с.
- Михеева Т. М., Остапеня А. П., Ковалевская Р. З., Лукьянова Е. В.* Пико- и нанофитопланктон пресноводных экосистем. Минск: Белгосунив, 1998. 196 с.
- Науменко М. А.* Эвтрофирование озер и водохранилищ: учебное пособие. СПб.: РГТМУ, 2007. 100 с.
- Озера Карелии.* Справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Оксиюк О. П., Жукинский В. Н. и др.* Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, вып. 4. С. 62–76.
- Русских Я. В., Чернова Е. Н., Воякина Е. Ю., Никифоров В. А., Жаковская З. А.* Определение цианотоксинов в водной матрице методом высокоэффективной жидкостной хроматографии – масс-спектрометрии высокого разрешения // Известия Санкт-Петербургского Государственного технологического института. 2012. №17(43). С. 061–066.
- Сабылина А. В., Мартынова Н. Н., Басов М. И.* Водоемы среднего участка реки Шуи и озеро Ведлозеро // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 139–145.
- Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р.* Умирающие озера. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 278 с.
- Хрисанов Н. И., Осипов Г. К.* Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 278 с.
- Чекрыжева Т. А.* Водоемы среднего участка реки Шуи и озеро Ведлозеро. Фитопланктон // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 148–150.
- Чекрыжева Т. А., Рыжков Л. П.* Экологическое состояние оз. Святозеро по фитопланктону // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: тезисы докл. V Всерос. науч. конф. (Апатиты, 24–27 июня, 2014). Апатиты, 2014. С. 243–269.
- Chislock M. F., Doster E., Zitomer R. A., Wilson A. E.* Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems // Nature Education Knowledge. 2013. N 4(4):10. P. 1–8.
- Glibert P. M., Seitzinger S., Heil C. A., Burkholder J. M., Parrow M. W.* The Role of Eutrophication in the Global Proliferation of Harmful Algal Blooms // Oceanography. Vol. 18, N 2. 2005. P. 198–209.
- Sladeczek V.* System of water quality from the biological point of view // Arch. F. Hydrobiol. Ergebnisse der Limnologie, Bd. 7. 1973. 218 p.

AUTUMN ALGAL BLOOM IN LAKE SVYATZERO IN 2019

V. Fyodorova

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk

A comparative analysis of phytoplankton parameters in different years of studies at Lake Svyatzero (1950–2013) is reported. The state of the lake's ecosystem and anthropogenic effects on it were assessed. In September 2019, the "bloom spot" in the northern part of Lake Svyatzero was surveyed by modern methods. It was found that in terms of saprobity, the lake water is moderately polluted (α -mesosaprobic zone). According to phytoplankton biomass, the water has a high degree of pollution. Lake Svyatzero belongs to the class of β -eutrophic waters.

СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ КОНДОПОЖСКОГО ЗАЛИВА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ФОРЕЛЕВЫХ ХОЗЯЙСТВ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ЗООПЛАНКТОНА

Ю. Ю. Фомина

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

Дана оценка современного состояния экосистемы Кондопожского залива в районе расположения форелевых хозяйств по показателям зоопланктона на основе наблюдений в июле 2017 г. В районе расположения форелевых хозяйств был обнаружен 31 таксон зоопланктона рангом до рода и ниже (Calanoida – 3; Cyclopoida – 4; Cladocera – 13; Rotifera – 11). Видовой состав зоопланктона представлен обычными для озер Карелии видами. В структуре зоопланктона отмечено преобладание коловраток (более 88 %), в основном представителей рода *Asplanchna*. Упрощение структуры сообщества зоопланктона в районе форелевых ферм выступает показателем увеличения трофии. Биомасса зоопланктона на станции KF2 соответствуют олиготрофии, на станции KF4 – α -мезотрофным условиям, что связано с расположением и глубиной станции.

Онежское озеро – один из крупнейших водоемов Европы, расположенный в северо-западном регионе России. Площадь озера составляет 9720 км², объем водной массы озера достигает 295 км³, средняя глубина – 30 м, максимальная – 120 м. Онежское озеро, как и большинство водоемов, подвергается антропогенному воздействию [Онежское..., 2010]. Несмотря на высокое качество воды и олиготрофное состояние экосистемы на большей части акватории озера, в его северо-западных заливах протекают процессы антропогенного эвтрофирования [Биоресурсы..., 2008; Тимакова и др., 2011, 2014 и др.]. Наиболее эвтрофированным участком водоема является Кондопожский залив, который с 1929 г. испытывает влияние загрязненных сточных вод Кондопожского ЦБК и коммунальных стоков г. Кондопоги [Тимакова и др., 2014]. В 1990-х гг. в заливе отмечались признаки реолиготрофизации из-за сокращения объема сточных вод, вызванного снижением мощности производства на ЦБК [Калинкина и др., 2017]. Вместе с тем с середины 2000-х гг. в Онежском озере интенсивно развивается форелеводство. В 2010 г. на озере функционировало 14 форелевых хозяйств объемом около 7000 т радужной форели, то есть около 80 % от общего объема выращиваемой форели в Карелии [Стерлигова и др., 2011], из них – 11 ферм расположены в Кондопожском заливе (<http://kareliatrout.ru/karta-rybnyh-hozjajstv/>). В условиях многофакторного антропогенного влияния и наращивания мощности товарного производства рыбы необходим постоянный контроль экологического состояния залива. Зоопланктон является чувствительным индикатором изменений окружающей среды, поскольку он имеет короткий период генерации, что позволяет зоопланктонным организмам быстро реагировать на факторы стресса. При повышении трофности водоемов в сообществе зоопланктона

отмечают увеличение численности отдельных видов, смену доминантов, появление видов-индикаторов, изменение соотношения основных таксономических групп, изменение количественных показателей [Андроникова, 1980].

В связи с этим целью работы стало изучение современных изменений в экосистеме Кондопожского залива в районе расположения форелевых хозяйств по показателям зоопланктона.

Исследования проводились в июле 2017 г. в Кондопожском заливе. Пробы зоопланктона были отобраны на станциях KF2 (глубина 30 м) и KF4 (глубина 9 м) вблизи форелевых ферм. Отбор проб производили с помощью сети Джели (диаметр 18,5 см; газ 100 мкм) от поверхности до дна. Обработка проб осуществлялась по стандартной методике [Методические..., 1984].

За период исследований был обнаружен 31 таксон зоопланктона рангом до рода и ниже. Из них Calanoida – 3, Cyclopoida – 4, Cladocera – 13, Rotifera – 11. Доминанты по численности и по биомассе *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Notholca caudata* Carlin, 1943, *Asplanchna* sp., субдоминанты – *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *Polyarthra dolichoptera* Idelson, 1925, *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863. Следует отметить, что реликтовый рачок *L. macrurus* обитает только в глубоких водоемах с выраженным гипolimнионом [Сушня и др., 1986]. В целом доминантный комплекс зоопланктона составляют широко распространенные в Онежском озере и других крупных озерах Карелии представители северной фауны, а также ряд эвритопных организмов, отличающихся широкой экологической валентностью [Куликова, 2017].

В видовом составе отмечены виды-индикаторы эвтрофирования *Ceriodaphnia pulchella* Sars, 1862, *Chydorus sphaericus* (Müller, 1785), *Bosmina longirostris* (Müller, 1785), *Keratella quadrata* (Müller, 1786), *Filinia longiseta* (Ehrenberg, 1834) [Андроникова, 1996]. Однако численность их невелика (менее 5 % от общей численности).

Для оценки разнообразия сообщества применяли индекс Шеннона – Уивера. Индекс видового разнообразия в среднем по численности составлял 2,76, по биомассе – 1,02. Согласно И. Н. Андрониковой [1996] индекс Шеннона по численности соответствует олиготрофному типу водоема, по биомассе эвтрофному типу. Такое противоречие связано с тем, что по численности зоопланктонные организмы распределены более равномерно, чем по биомассе, поскольку коловратки рода *Asplanchna* достигали 89 % от общей биомассы.

В структуре зоопланктона по численности (более 89 %) и по биомассе (более 88 %) преобладали коловратки. В начале июля поверхностные слои воды прогреваются выше 10 °С, наступает период «биологического лета», именно в этот период отмечаются оптимальные трофические условия для роста коловраток [Сярки, Фомина, 2016]. Сезонная динамика зоопланктона имеет общие закономерности в разных районах озера и крупных заливах. Ранее было показано, что в Онежском озере в июле преобладают коловратки [Сярки, 2013; Сярки, Фомина, 2015; Фомина, Сярки, 2018].

Количественные показатели на станции KF2 (численность 28,9 тыс. экз./м³, биомасса 0,82 г/м³) были почти в 3 раза ниже, чем на станции KF4 (численность 77,3 тыс. экз./м³, биомасса 2,34 г/м³). Причина таких высоких показателей связана с расположением станции. Станция KF4 находится в прибрежной мелководной части залива, которая испытывает незначительное воздействие ветров и течений, подвержена антропогенному влиянию от сельскохозяйственных угодий, расположенных вдоль берега. На количественные показатели влияет небольшая глубина станции, поскольку основная масса зоопланктона концентрируется в верхнем 10-м слое [Куликова и др., 1997]. Биомасса зоопланктона на станции KF2 соответствует олиготрофным условиям, на станции KF4 – α-мезотрофным [Китаев, 2007].

В районе расположения форелевых хозяйств видовой состав зоопланктона представлен обычными для озер Карелии видами. Вклад видов-индикаторов эвтрофирования в общую численность сообщества составил менее 5 %. Индекс Шеннона – Уивера характеризуется высокими значениями по численности и низкими значениями по биомассе. В структуре зоопланктона отмечено преобладание коловраток (более 88 %), в основном представителей рода *Asplanchna*. Упрощение структуры сообщества зоопланктона в районе форелевых ферм выступает показателем увеличения трофии. Биомасса зоопланктона на станции KF2 соответствуют олиготрофии, на станции KF4 – α-мезотрофным условиям, что связано с расположением и глубиной станции.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ и Республики Карелия в рамках научного проекта № 18-44-100007 p_a.

Список литературы

- Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
- Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 272 с.
- Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России. 2017. № 1. С. 4–18.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 395 с.
- Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов Республики Карелия (Россия): история изучения, основные направления исследований, видовой состав, библиография. Рига: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2017. 125 с.
- Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1997. 112 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция. Л.: Изд-во ГосНИОРХ, 1984. 33 с.
- Онежское озеро. Атлас. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
- Стерлигова О. П., Китаев С. П., Ильмаст Н. В., Комулайнен С. Ф., Кучко Я. А., Павловский С. А., Савосин Е. С. Состояние заливов Онежского озера при товарном выращивании радужной форели // Поволжский экологический журнал. 2011. № 3. С. 386–393.
- Суцеля Л. М., Семенченко В. П., Вежновец В. В. Биология и продукция ледниковых реликтовых ракообразных. Минск: Наука и техника, 1986. 160 с.
- Сярки М. Т. Как долго длится лето для зоопланктона Онежского озера? // Принципы экологии. 2013. № 4. С. 39–44.
- Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Определение динамических характеристик зоопланктона Онежского озера // Принципы экологии. 2016. № 4. С. 26–33.
- Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Экологические исследования. 2015. № 1. С. 63–68.
- Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 74–82.
- Тимакова Т. М., Сабьлина А. В., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Современное состояние экосистемы Онежского озера и тенденции ее изменения за последние десятилетия // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 42–49.
- Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Современное состояние зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера и его отклик на изменение климата // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология. Океанология. 2018. № 9. С. 54–64.

STATE OF THE KONDOPOZHSKY BAY (LAKE ONEGO) ECOSYSTEM IN THE AREA HOLDING TROUT FARMS, ASSESSED USING ZOOPLANKTON AS INDICATORS

Yu. Fomina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

An assessment is made of the current state of the Kondopoga Bay ecosystem in the region with operating trout farms using zooplankton indices based on observations in July 2017. Around the trout farms, 31 zooplankton taxa with the rank of a genus or lower (Calanoida – 3; Cyclopoida – 4; Cladocera – 13; Rotatoria – 11) were found. The species composition of zooplankton is represented by species common to lakes of Karelia. The dominance of rotifers (more than 88 %), mainly representatives of the genus *Asplanchna*, was noted in the structure of zooplankton. Simplification of the structure of the zooplankton community in the region of trout farms is an indicator of an increase in the nutrient content. Zooplankton biomass at site KF2 corresponds to oligotrophy, at site KF4 – to α -mesotrophic conditions, which is connected with the site's location and depth.

ФЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЗЫ ЗООПЛАНКТОНА ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

Ю. Ю. Фомина

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск

Показано, что в годовом цикле зоопланктона существуют 5 фенологических фаз (зимняя, весенняя, раннелетняя, позднелетняя, осенняя). Дана характеристика каждой фенологической фазы (сроки начала, окончания, продолжительности, особенности видового состава, структуры сообщества и количественных показателей).

Онежское озеро – второй по величине водоем Европы и европейского Северо-Запада России. В северо-западной части водоема располагается один из крупнейших заливов – Петрозаводский. Он служит источником водоснабжения для города Петрозаводска. Петрозаводская губа находится под влиянием промышленно-бытовых, ливневых стоков города и вод реки Шуи, обогащенных органическим веществом и железом. В последние десятилетия антропогенная нагрузка на залив снизилась, объем сточных вод Петрозаводского коммунально-промышленного узла уменьшился с 50 млн м³ в год до 30 млн м³ [Калинкина и др., 2017]. Однако в связи с климатическими изменениями в Петрозаводской губе отмечено увеличение содержания аллохтонного органического вещества, цветности, взвешенных веществ, общего фосфора и железа [Калинкина и др., 2018, 2019]. Кроме того, в водоеме отмечаются сдвиги сроков основных гидрологических явлений, например, сокращение периода ледостава, удлинение периода биологического лета [Филатов и др., 2012, 2014; Efremova et al., 2013]. В связи с этим особый интерес вызывает выявление закономерностей сезонной динамики и фенологии зоопланктона Петрозаводской губы для оценки реакции экосистемы на изменение климата и колебаний антропогенной нагрузки.

Для анализа сезонной динамики и выявления особенностей фенологии зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера привлекались данные по станциям в центральной части залива с 1988 по 2010 гг. (180 проб) [Сярки, Куликова, 2012; Сярки и др., 2015].

Подробные сведения о состоянии зоопланктона в зимний период получены в рамках Российско-Швейцарского мультидисциплинарного проекта «Lake Ladoga: life under ice interplay of under-ice processes by global change», март 2015–2016 гг. (64 пробы).

В годовом цикле зоопланктона наблюдается высокая изменчивость показателей, что позволяет выделить периоды (фенологические фазы) с характерными особенностями состава, структуры и количества. По соотношению основных таксономических групп зоопланктона статистически достоверно были выделены 5 фенологических фаз методом дискриминантного анализа. Были определены сроки начала, окончания и продолжительности фаз, наличие переходных периодов [Сярки, Фомина, 2015; Фомина, Сярки, 2018].

Структурообразующими видами (частота встречаемости организмов в пробе более 50 %) во все фенофазы являлись *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863, *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863), *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863), *Daphnia cristata* Sars, 1862, *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879). В период открытой воды (с мая по октябрь) к ним добавлялись *Eurytemora lacustris* (Poppe, 1887), *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857), *Bosmina longispina* Sars, 1862, *Bosmina coregoni* Baird, 1857, *Chydorus sphaericus* (Müller, 1785), *Bipalpus hudsoni* (Imhof, 1891), *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850.

Зимняя фенофаза

Зимняя фенофаза зоопланктона наблюдается с начала установления ледового покрова и до очищения ото льда, средние даты для залива – 18 декабря и 9 мая, соответственно. Среднегодовалая продолжительность ледостава на Петрозаводской губе составляет 144 суток [Ефремова, Пальшин, 2015]. Подо льдом отмечены низкие температуры воды, дефицит солнечного света, минимальные показатели бактериопланктона, фитопланктона, концентрации хлорофилла «а». Кроме того, в зимнем фитопланктоне Петрозаводской губы основная доля общей биомассы приходится на крупноразмерные малосъедобные для зоопланктона диатомовые водоросли [Suarez et al., 2019].

В число структурообразующих видов (частота встречаемости организмов в пробе 35–50 %) входили *Cyclops kolensis* Lilljeborg, 1901, *Notholca cinetura* Skorikov, 1914, *Keratella cochlearis*, *Asplanchna priodonta*.

Зимой по численности и биомассе доминировали круглогодичные виды *Limnocalanus macrurus*, *Eudiaptomus gracilis* и типично зимний вид *Megacyclops gigas* (Claus, 1857), среди субдоминантов отмечены *Thermocyclops oithonoides*, *Kellicottia longispina*.

В зоопланктонном сообществе преобладали науплии *Limnocalanus macrurus* и *Megacyclops gigas*, которые размножались в этот период. *Mesocyclops leuckarti* и *Thermocyclops oithonoides* встречались только на стадии старших копеподитов в диапаузе в придонных слоях. Веслоногие рачки составляли в структуре сообщества около 90 % по численности и по биомассе. Ветвистоусые рачки были представлены незначительно (менее 1 %), в основном *Daphnia cristata*. Коловратки составляли в среднем 10 %.

В подледный период отмечены самые низкие показатели в годовом цикле, численность составляла $0,56 \pm 0,04$ тыс. экз./м³, биомасса – $0,015 \pm 0,001$ г/м³.

Весенняя фенофаза

Весенняя фенофаза наблюдается с таяния льда и продолжается до конца июня – начала июля, длится примерно 26 суток. В этот период основу биомассы фитопланктона составляют крупноразмерные диатомовые водоросли, цианобактерии и, наиболее предпочтительный корм для зоопланктона, хлорококковые водоросли, они малочисленны и только начинают развиваться [Вислянская, 1999]. Весной происходит улучшение трофических условий, увеличивается численность и биомасса бактерий, биомасса фитопланктона, концентрация хлорофилла «а» [Сярки и др., 2015].

К доминантам по численности и по биомассе относились *Limnocalanus macrurus*, *Asplanchna priodonta*, *Kellicottia longispina*, к субдоминантам – *Cyclops abyssorum* Sars, 1863, *Bosmina longispina*.

Доминантный и структурообразующий комплекс был дополнен типично весенними коловратками *Notholca cinetura* и *Notholca caudata* Carlin, 1943.

В весеннюю фенофазу отмечено снижение в сообществе роли веслоногих рачков и увеличение значения коловраток. Так, по численности средняя доля веслоногих рачков – 38 %, коловраток – 55 %, по биомассе веслоногих рачков – 65 %, коловраток – 27 %. Роль ветвистоусых рачков в структуре по численности и по биомассе около 7 %.

Весной численность и биомасса зоопланктонного сообщества более чем в 5 раз превышала зимние значения и была зафиксирована $3,14 \pm 0,39$ тыс. экз./м³, биомасса – $0,085 \pm 0,008$ г/м³.

Раннелетняя фенофаза

Раннелетняя фенофаза развития зоопланктона наблюдается в июле, длится примерно 25 суток. В этот период был отмечен активный прогрев водных масс, зафиксированы наибольшие показатели биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла «а», показатели численности и биомассы бактериопланктона в период открытой воды имели примерно одинаковые значения, количество сапрофитных бактерий, которые указывают на присутствие в воде легкоразлагаемого органического вещества, увеличивалось [Сярки и др., 2015]. В начале июля доля диатомовых снижается, увеличивается доля сине-зеленых и хлорококковых водорослей [Вислянская, 1999].

В числе структурообразующих видов (частота встречаемости организмов в пробе более 50 %) зафиксированы виды, типичные только для раннелетней фенофазы, – *Bosmina longirostris* (Müller, 1785), *Polyphemus pediculus* (Linnaeus, 1761). Также были отмечены *Leptodora kindtii* (Focke, 1844), *Euchlanis dilatata* Ehrenberg, 1832 и *Heterocope appendiculata* Sars, 1863.

В доминантный комплекс входили *Limnocalanus macrurus*, *Bosmina longispina*, *Asplanchna priodonta*, *Asplanchna herricki* Guerne, 1888, *Kellicottia longispina*.

В структуре по численности (более 55 %) и по биомассе (более 52 %) преобладали коловратки. Значение ветвистоусых рачков увеличивалось по численности и по биомассе (более 20 %), веслоногих уменьшалось (19 и 26 %, соответственно).

В этот период отмечены максимальные значения численности и биомассы зоопланктона в годовом цикле (численность $18,05 \pm 4,60$ тыс. экз./м³, биомасса $0,538 \pm 0,064$ г/м³).

Позднелетняя фенофаза

Позднелетняя фенофаза наблюдается с конца июля и продолжается до конца августа – начала сентября, длится примерно 32 дня. В этот период по сравнению с ранним летом биомасса фитопланктона снижалась более чем в 2 раза, однако концентрации хлорофилла «а» были отмечены

высокие. Показатели бактериопланктона сохраняются на том же уровне, кроме сапрофитных бактерий, численность которых в 3,5 раза выше, чем в раннелетнюю фенофазу [Сярки и др., 2015]. В августе активно развивается летний комплекс диатомовых водорослей, также активно развиваются сине-зеленые, хлорококковые, желто-зеленые и криптофитовые водоросли [Вислянская, 1999].

Структурообразующий комплекс (частота встречаемости организмов в пробе более 50 %) дополняют *Limnospira frontosa* Sars, 1862, *Daphnia longispina* Müller, 1785, *Diaphanosoma brachyurum* (Lievins, 1848), причем последний рачок встречается только в позднелетнюю фенофазу.

Доминантами по численности и по биомассе были *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops oithonoides*, *Daphnia cristata*, *Kellicottia longispina*, субдоминанты – *Limnocalanus macrurus*, *Eudiaptomus gracilis*, *Bosmina longispina*, *Daphnia longispina*, *Asplanchna priodonta*, *Asplanchna herricki*.

В структуре зоопланктона по численности преобладают веслоногие (в среднем 43 %) и ветвистоусые (в среднем 23 %) рачки, доля коловраток в среднем 23 %, по биомассе доля веслоногих составляла в среднем 32 %, ветвистоусых – 44 %, коловраток – 24 %.

По сравнению с ранним летом в позднелетнюю фазу количественные показатели зоопланктонного сообщества снижаются примерно в 1,5 раза (численность $13,22 \pm 1,00$ тыс. экз./м³, биомасса $0,348 \pm 0,032$ г/м³).

Осенняя фенофаза

Осенняя фенофаза наблюдается с начала сентября до образования ледяного покрова, длится примерно 106 суток. В этот период показатели бактериопланктона сохраняют свой уровень, количество сапрофитных бактерий снижается в 4,5 раза по сравнению с поздним летом, концентрация хлорофилла «а» снижается примерно в 2 раза [Сярки и др., 2015]. В сентябре и октябре интенсивность вегетации водорослей в целом невысокая, хотя в октябре отмечается небольшой подъем развития диатомовых [Вислянская, 1999].

Среди структурообразующих видов (частота встречаемости организмов в пробе более 50 %), как и в позднелетнюю фенофазу, отмечены *Limnospira frontosa* Sars, 1862, *Daphnia longispina* Müller, 1785.

В числе доминантных видов отмечены *Limnocalanus macrurus*, *Eudiaptomus gracilis*, *Daphnia cristata*, *Kellicottia longispina*, субдоминанты – *Eurytemora lacustris*, *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops oithonoides*, *Bosmina longispina*.

В структуре, как и в видовом составе, увеличивалась доля веслоногих рачков (более 65 % по численности и по биомассе), доля ветвистоусых рачков и коловраток по численности снижалась в среднем до 16 %, по биомассе – в среднем до 22 и 12 %, соответственно.

Количественные показатели зоопланктона в осеннюю фенофазу снижались в 2,5 раза по сравнению с поздним летом (численность $5,40 \pm 1,04$ тыс. экз./м³, биомасса $0,141 \pm 0,025$ г/м³).

В годовом цикле зоопланктона существуют 5 фенологических фаз (зимняя, весенняя, раннелетняя, позднелетняя, осенняя). Каждая фенологическая фаза зоопланктона имеет свои особенности, сроки начала, окончания и продолжительности и характеризуется определенным видовым составом, структурой сообщества и количественными показателями.

Знание сезонных процессов и фенологии зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера позволит детализировать механизмы его функционирования в годовом цикле и оценить реакцию на изменение температурных условий и антропогенного фактора.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-44-100007.

Список литературы

Вислянская И. Г. Структура и динамика биомассы фитопланктона // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 146–158.

Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Многолетняя изменчивость температуры воды и ледовая фенология // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 38–44.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т. Экосистема Онежского озера: реакция водных сообществ на антропогенные факторы и климатические изменения // Водное хозяйство России. 2017. № 1. С. 4–18.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сабьлина А. В., Рыжиков А. В. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х г. // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2019. № 1. С. 62–72.

Калинкина Н. М., Филатов Н. Н., Теканова Е. В., Балаганский А. Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // Региональная экология. 2018. № 2(52). С. 7–15.

Сярки М. Т., Куликова Т. П. «Зоопланктон Онежского озера». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012621150. Дата регистрации в реестре баз данных 9 ноября 2012 г.

Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжова Т. А. «Планктон пелагиали Онежского озера». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620274. Дата регистрации в реестре баз данных 13 февр. 2015 г.

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Экологические исследования. 2015. № 1. С. 63–68.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р., Ожигина В. Н., Богдан М. И. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 80–93.

Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Влияние изменения климата на экосистемы озер Севера Европейской территории России // Учен. зап. Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. № 34. С. 48–55.

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Современное состояние зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера и его отклик на изменение климата // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология. Океанология. 2018. № 9. С. 54–64.

Efremova T., Palshin N., Zdorovenov R. Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes // Estonian Journal of Earth Sciences. 2013. Vol. 62, N 1. P. 33–41.

Suarez E. L., Tiffay M.-C., Kalinkina N., Tchekryzheva T., Sharov A., Tekanova E., Syarki M., Zdorovenov R. E., Makarova E., Mantzouki E., Venail P., Ibelings B. W. Diurnal variation in the convection-driven vertical distribution of phytoplankton under ice and after ice-off in large Lake Onego (Russia) // Inland Waters. 2019. Vol. 9, N 2. P. 1–12.

PHENOLOGICAL PHASES OF ZOOPLANKTON IN PETROZAVODSK BAY OF LAKE ONEGO

Yu. Fomina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

It is shown that the annual cycle of zooplankton has 5 phenological phases (winter, spring, early summer, late summer, autumn). A description is provided for each phenological phase (time of onset, end, duration, species composition, community structure, and quantities).

ТРОФИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗООПЛАНКТОНА ОЗЕРА ЛЕЩЕВОГО (О. ВАЛААМ, ЛАДОЖСКОЕ ОЗЕРО)

А. Н. Чернышев

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Проанализирована пространственная изменчивость соотношения трофических групп зоопланктона озера Лещевого (о. Валаам, Ладожское озеро) в августе 2019 г. На всех станциях зафиксирована высокая биомасса зоофагов (до 75 % от общей биомассы). В исследуемый период озеро характеризовалось пространственной изменчивостью численности основных трофических групп. Наибольшие различия были характерны для станций, расположенных в непосредственной близости от мелиорируемых полей.

Проблема антропогенного воздействия на водные экосистемы – одна из наиболее актуальных в современном мире. В результате активного природопользования изменяются соотношения компонентов в трофической сети водоемов. Подобные изменения могут привести к нарушению функционирования всей системы или к ее перестройке. Зоопланктон – важный элемент трофической сети, осуществляющий транзит органического вещества от продуцентов к консументам и редуцентам. Чувствительность зоопланктона к внешним воздействиям позволяет использовать его характеристики для выявления и оценки антропогенного влияния на водоем [Андроникова, 1996; Lehtovaara et al., 2014]. Одной из таких характеристик является трофическая структура сообщества.

Степень антропогенного воздействия в пределах одного водного объекта может быть довольно неоднородной. Именно такая ситуация наблюдается на исследуемом водоеме – оз. Лещевом. В 2015 – 2017 гг. в северо-западной части его водосбора были проведены мелиоративные работы [Экосистемы..., 2016]. В настоящее время на этой территории выращиваются кормовые культуры для крупного рогатого скота. В связи с этим, а также со сложной формой озера возникает необходимость оценки пространственно-временной изменчивости трофических характеристик сообщества гидробионтов. Важную роль в оценке изменчивости играют данные мониторинговых наблюдений, позволяющие описать сообщество гидробионтов как до начала антропогенного вмешательства, так и после. На территории о. Валаам подобные наблюдения проводятся на базе Учебно-научной станции РГГМУ с 1997 г.

Цель работы: оценка трофической структуры зоопланктона оз. Лещевого в августе 2019 г. Задачи: сравнительный анализ видового состава на исследуемых станциях; оценка пространственной изменчивости соотношения трофических групп зоопланктона по численности и биомассе.

Исследование проводилось на о. Валаам, расположенном в северной части Ладожского озера. Озеро находится в южной части острова. Оно характеризуется довольно сложной формой с двумя заливами – северо-восточным и северо-западным. Оз. Лещевое (S – 0,17 км²) является крупнейшим по площади среди малых озер Валаама, отличается относительно обширной водосборной площадью в 2,5 км² [Степанова и др., 2010]. Средняя глубина водоема – 1,6 м, максимальная – до 7 м – в его северо-восточной части. По имеющимся данным озеро может быть классифицировано как нейтральное, мезо-мезополигумусное с высоким содержанием CO₂ [Степанова и др., 2019].

Исследование проводилось на базе Учебно-научной станции РГГМУ на о. Валаам. Отбор проб сетяного зоопланктона осуществлялся 6–7 августа 2019 г. на 6 станциях, распределенных по акватории озера. Отлов интегральной пробы (поверхность – дно) производился количественной планктонной сетью Джели (диаметр верхнего кольца 18 см, размер ячеек 180 мкм). Последующая обработка проводилась в соответствии со стандартными методиками [Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений, 1983].

Всего в период исследования было обнаружено 11 видов зоопланктона, из которых 2 вида относятся к Cyclozoidea, 1 – к Calanoida, 8 – к Cladocera. К массовым видам относились *Eudiaptomus gracilloides* Lilljeborg, *Daphnia cristata* Sars, *Thermocyclops oithonoides* Sars. Численность в пределах станций изменялась от 2,2 экз./л до 56,9 экз./л, биомасса – от 0,02 мг/л до 0,73 мг/л. Индекс видового разнообразия Шеннона – Уивера был довольно низким и варьировал от 0,7 бит/экз. до 1,1 бит/экз. Трофическая структура представлена фильтраторами, зоофагами и организмами со смешанным питанием. В свою очередь, фильтраторы были разделены на две группы: «тонкие» – размер поглощаемых частиц менее 20 мкм; «грубые» – размер частиц более 20 мкм [Монаков, 1998]. Упрощенная схема трофической структуры представлена на рис. 1.

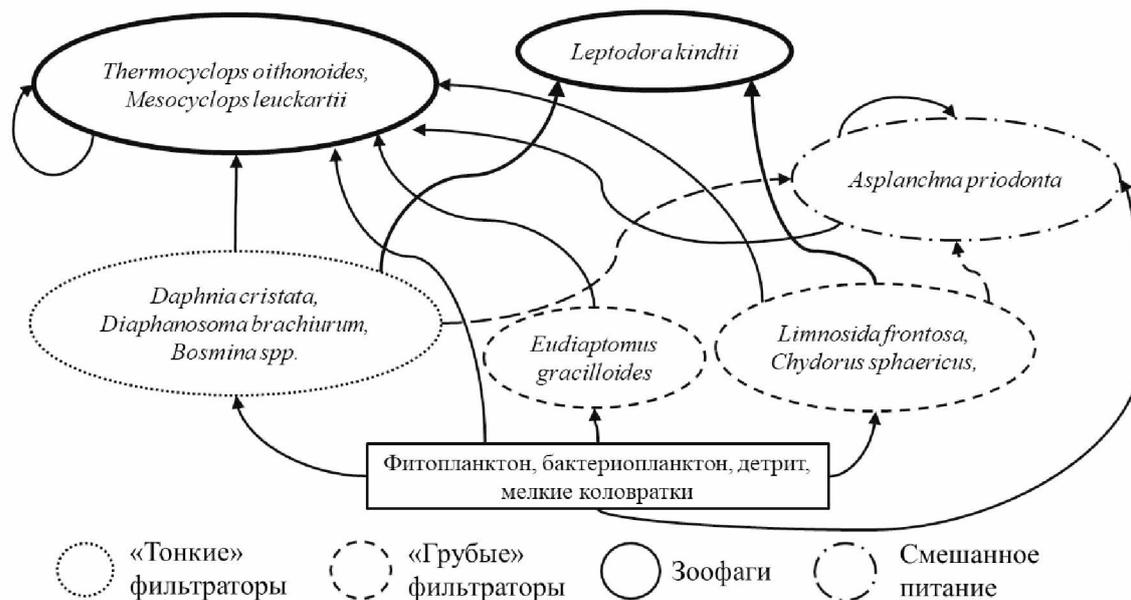


Рис. 1. Упрощенная трофическая структура сетяного зоопланктона оз. Лещевого в исследуемый период

Анализ пространственной изменчивости соотношения трофических групп показал, что для всех станций характерна высокая доля (более 70 %) зоофагов в общей численности (рис. 2).

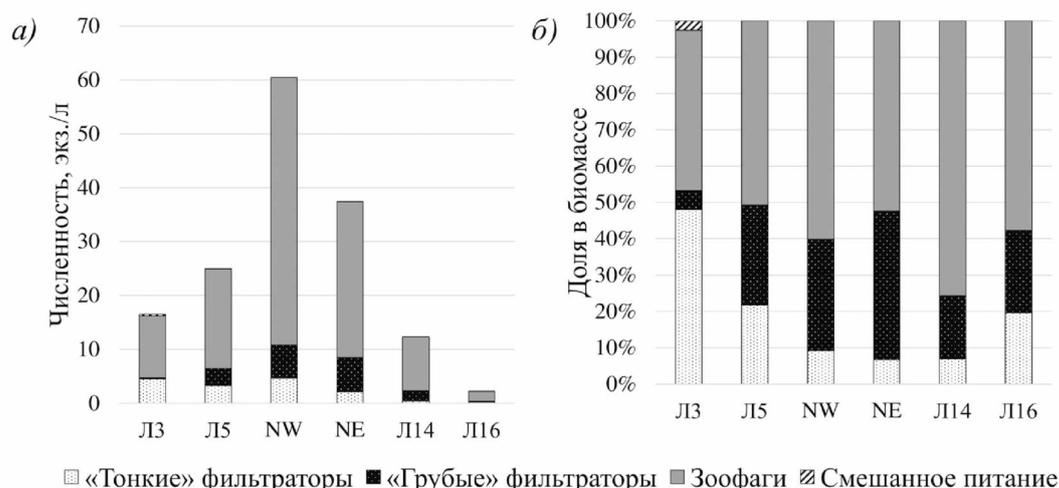


Рис. 2. Соотношение трофических групп зоопланктона по численности (а) и биомассе (б) в оз. Лещевом в августе 2019 г.

Самые низкие значения численности зафиксированы в различных частях озера: в южной части на станции Л3, в зоне активной вегетации кубышки *Nuphar lutea*; в северо-восточной части на станциях Л14 и Л16, рядом с сельскохозяйственными полями. Точка Л3 отличалась сходной долей зоофагов и фильтраторов в общей биомассе (45 % и 53 %, соответственно). Низкая численность зоопланктона, возможно, также связана с расположением станции рядом с зарослями макрофитов.

Станции Л14 и Л16, в свою очередь, отличались довольно невысокой долей фильтраторов (25 % и 43 %, соответственно). Близкое расположение станций к сельскохозяйственным территориям позволяет предположить, что зоопланктон в данной зоне подвергается угнетению. Это может быть вызвано активным поступлением с распахиваемых полей органического и неорганического вещества и ухудшением условий обитания. Наибольшая степень угнетения всех групп зоопланктона наблюдалась на станции Л16, наиболее близкой к полям. Об этом говорит минимальное в исследуемый период значение общей численности (2,2 экз./л). На станции Л14, расположенной несколько южнее, угнетению подвергались в основном фильтраторы. Это, вероятно, связано с засорением их фильтрационного аппарата взвешенными веществами. Следует упомянуть, что на станциях Л5 и NW, расположенных в северо-западной части озера и удаленных от сельскохозяйственных полей, численность была заметно выше.

Полученные нами на мониторинговой станции NE значения структурных характеристик зоопланктона были сопоставлены с данными за 1997–1999 гг. (конец июля – август), характеризующими фоновый период функционирования водоема (рис. 3).

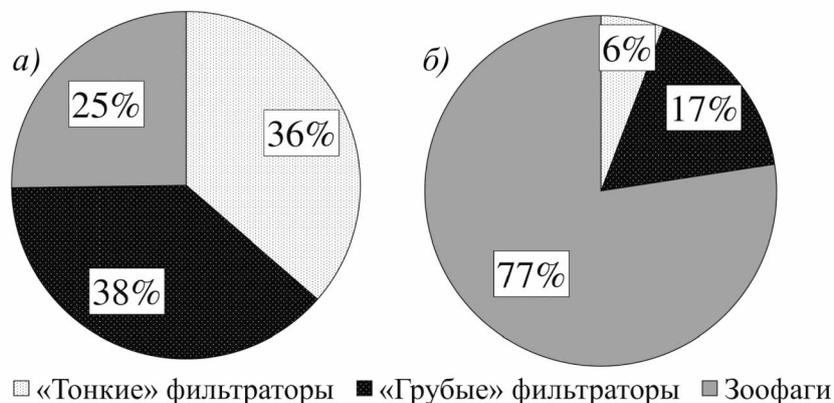


Рис. 3. Соотношение численности трофических групп зоопланктона оз. Лещевого в 1997–1999 гг. (а) и 2019 г. (б)

В 2019 г. наблюдалась высокая доля зоофагов. По сравнению с 1997–1999 гг. их доля в численности увеличилась в 3 раза. Доля остальных групп уменьшилась более чем в 2 раза. Вероятно, это также связано с увеличением активности поступления аллохтонного органического и неорганического вещества с водосбора, преимущественно с распахиваемых полей. В ряде исследований было показано, что в таких условиях снижается численность фильтраторов из-за «засорения» фильтрующего аппарата, в доминантном комплексе начинают преобладать хищные виды [Зиновьев, Китаев, 2015].

Таким образом, в трофической структуре зоопланктона на всех исследованных станциях наблюдалась высокая доля зоофагов (доля в биомассе изменялась от 45 % до 75 %). Максимальное значение зафиксировано на станциях рядом с сельскохозяйственными полями, что, вероятно, связано с угнетением организмов-фильтраторов за счет активного поступления аллохтонного вещества не только в растворенной форме, но и в виде взвеси. В целом соотношение трофических групп в водоеме характеризовалось выраженной пространственной изменчивостью. По сравнению с начальным периодом наблюдений (1997–1999 гг.) в 2019 г. доля зоофагов увеличилась более чем в два раза. Вероятно, это могло быть вызвано увеличением антропогенной нагрузки на водосбор оз. Лещевого.

Список литературы

- Андроникова И. Н.* Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
- Зиновьев Е. А., Китаев А. Б.* О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 5. С. 283–288.
- Монаков А. В.* Питание пресноводных беспозвоночных. М.: Тип. Россельхозакадемии, 1998. 322 с.
- Степанова А. Б., Воякина Е. Ю., Чернышев А. Н.* Межгодовая изменчивость основных лимнологических параметров оз. Лещево (Природный парк «Валаамский архипелаг», Ладожское озеро), 1998–2018 гг. // Труды III Всерос. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: Химиздат, 2019. С. 950–953.
- Степанова А. Б., Шарафутдинова Г. Ф., Воякина Е. Ю.* Гидрохимические особенности малых озер о. Валаам // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. № 12. С. 97–109.
- Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений.* Л.: Гидрометеоздат, 1983. 239 с.
- Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже 20 и 21 вв. Черты уникальности и современное состояние / под ред. А. Б. Степанова.* СПб.: РГГМУ, 2016. 44 с.
- Lehtovaara A. et al.* Responses of zooplankton to long-term environmental changes in a small boreal lake // Boreal environment research. 2014. Vol. 19. P. 97–111.

ZOOPLANKTON TROPHIC STRUCTURE IN LAKE LESHCHOVOYE (VALAAM ISLAND, LAKE LADOGA)

A. Chernyshev

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

The spatial variability of the ratio of zooplankton trophic groups in Lake Leshchovoye (Valaam Island, Lake Ladoga) in August 2019 was analyzed. A high biomass of zoophagous organisms (up to 75 % of the total biomass) was found at every sampling site. In the study period, the lake was characterized by spatial variability in the abundance of major trophic groups. Differences were the greatest at the sampling sites located near ameliorated fields.

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ВОДОЕМОВ

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КОТЛОВИНЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

П. Ю. Беляев

*ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург
ФГБУ «ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского», Санкт-Петербург
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

В период с 2016 по 2019 гг. на акватории Онежского озера проводились работы по геологическому пробоотбору, геофизической съемке и стационарному бурению в рамках проектов по изучению четвертичного чехла крупнейших озер Европы. Данные работы велись при участии сотрудников ВСЕГЕИ, ИВПС КарНЦ РАН, СПбГУ и МГУ. В ходе работ были впервые за период с начала 2000-х гг. получены сведения о строении верхнеплейстоцен-голоценового чехла котловины Онежского озера, по результатам которых была составлена схематическая карта строения четвертичных отложений.

Онежское озеро – второе по величине озеро в Европе после Ладожского. Площадь озера составляет 10 тыс. км², средняя глубина – 31 м [Ладожское озеро. Мониторинг..., 2000; Ладога, 2013]. Рельеф озерной котловины, как и в Ладожском озере, характеризуется наибольшей степенью расчленения в северной части и наименьшей в южной. Поскольку Онежское озеро второй крупнейший бассейн Северо-Запада, оно является одним из наиболее значимых банков палеогеографической и геологической информации, так как несет в себе достаточное количество данных об эволюции региона как в плане форм рельефа, так и в плане четвертичных отложений. Вместе с этим данный объект является одним из самых наименее интенсивно изучаемых за последние годы. Лишь в недавнее время при участии сотрудников ВСЕГЕИ, ИВПС КарНЦ РАН, СПбГУ и МГУ были возобновлены работы по исследованию данного объекта и прилегающих водоемов. В данной статье обсуждаются результаты изучения строения четвертичного покрова в северной части озера, полученные в период 2016–2019 гг., а также представлен предварительный макет карты четвертичных отложений данного района, построенный на основании описанных данных, дополненных сведениями о строении четвертичного покрова, изложенными в работах Полярной морской геологоразведочной экспедиции в 2002 г.

Материалы и методы исследования

Новый цикл изучения верхнеплейстоцен-голоценовых отложений котловины Онежского озера начался с 2016 г. в Петрозаводской губе. Были выполнены комплексные геолого-геофизические исследования, включающие непрерывное сейсмоакустическое профилирование, гидролокацию бокового обзора, геологический пробоотбор и бурение со льда. Работы по НСАП на акватории Онежского озера велись при помощи комплекса источника типа спаркер и многоканальной пьезоколы с шагом 2 м. Гидролокация бокового обзора велась при помощи комплекса StarFish, излучение сигнала раз в 6 сек. Скорость судна при этом составляла 4–5 узлов. Впоследствии на основании геофизической съемки были выбраны точки для геологического пробоотбора и бурения. Интерпретация данных геофизической съемки велась в программном пакете KINGDOM 8.5.

Геологический пробоотбор велся при помощи гравитационной трубы весом около 300 кг и длиной приблизительно 3 м. Всего для северной части озера было отобрано 24 колонки донных отложений, вскрывающих преимущественно голоценовую часть разреза, однако в некоторых точках удалось вскрыть и отложения, соответствующие различным стадиям приледниковых обстановок. Гораздо более полный разрез озерных отложений удалось получить посредством стационарного бурения, которое велось при использовании буровой установки производства фирмы UWITEC. Благодаря этой системе удалось получить выход керна, достигающий до 12 м, и пройти плотные флювиогляциальные отложения $fgIIIos$, сложенные грубозернистым песком и гравием.

Впоследствии все керны, полученные в результате работ по геологическому пробоотбору и бурению, были запакованы в специальные пеналы и отправлены для изучения литологического состава и датирования в лаборатории СПбГУ, МГУ и КарНЦ РАН. Ниже (рис. 1) приведена схема расположения точек пробоотбора на акватории Онежского озера.



Рис. 1. Схема расположения фактического материала полевых работ 2016–2019 гг. в северной части Онежского озера

Результаты и их обсуждение

В результате работ по геофизической съемке и геологическому пробоотбору удалось установить наличие следующих типов отложений на дне озера: gIIIos – морены осташковской стадии валдайского оледенения. Представлены валунами и крупной галькой. Данный тип отложений не был вскрыт бурением и геологическим пробоотбором, однако распространен в некоторых частях береговой зоны и заметен на сейсмоакустической записи. Характеризуется хаотичным характером записи в виде разнонаправленных рефлекторов, зачастую сливается с акустическим фундаментом. На моренах залегают флювиогляциальные отложения fgIIIos, в состав которых входят крупные пески с галькой, дресвой и щебнем. Вскрыты бурением в Петрозаводской губе и геологическим пробоотбором в открытой части. На сейсмоакустической записи характеризуются неярко выраженной субгоризонтальной слоистостью. Формируют озы в открытой части озера и в Петрозаводской губе (будет показано на схеме четвертичных отложений, представленной далее). Выше по разрезу залегают лимногляциальные отложения lgIIIos, соответствующие различным стадиям приледниковых озер. Представлены глинами с прослоями алеврита и алевропелита, иногда встречаются включения песка различной зернистости и примазки гидроокислов марганца [Страховенко и др., 2018]. На сейсмоакустической записи имеют четко выраженную субгоризонтальную слоистость и облегающий характер залегания по отношению к fgIIIos. Венчают разрез озерные отложения ленинградского горизонта lnH, сложенные глинистыми алевритами и гомогенизированными илами. В верхней части разреза находятся сильно обводненные текучие илы, типичные для зон нефелоидной седиментации. Данный тип отложений широко распространен на акватории озера, заполняет наиболее глубоководную открытую часть озера и заливов. Имеет широкое площадное распространение, но легко подвергается размыву, вследствие чего в некоторых местах выклинивается, обнажая подстилающие породы.

Ниже (рис. 2) приведен фрагмент сейсмоакустической записи из северной части Онежского озера, для лучшего понимания строения четвертичного покрова и более наглядного отображения вышеописанного материала.

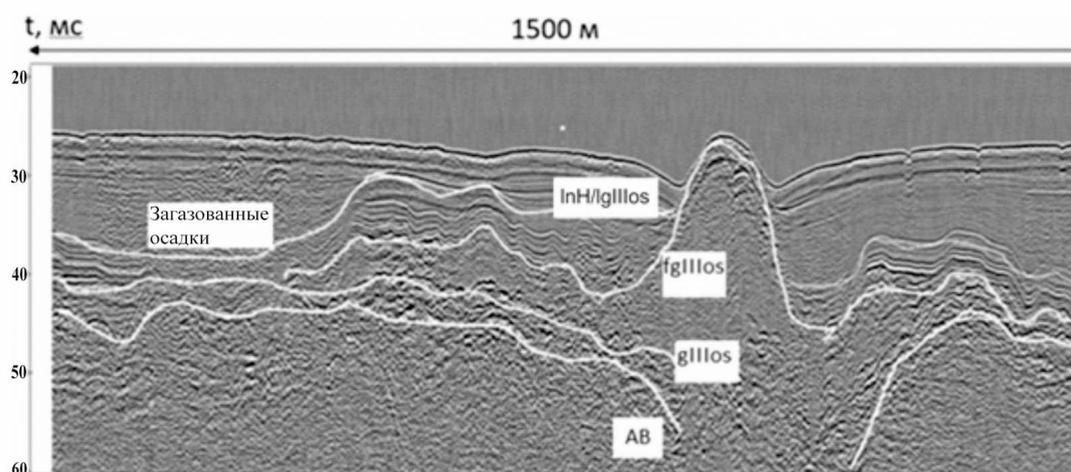


Рис. 2. Пример сейсмоакустической записи из северной части Онежского озера

Кроме того, по косвенным признакам были выделены отложения подводных гравитационных процессов и озерный ундальювий, распространенный преимущественно по берегам.

Выводы

Результаты геологического пробоотбора и бурения были сопоставлены между собой, построены локальные схемы корреляции и сводные разрезы, которые были сопоставлены с данными геофизики и впоследствии соотнесены с данными АО ПМГРЭ [Макарьев и др., 2002]. В результате была составлена схематическая карта четвертичных отложений для северной части озера. Открытая глубоководная часть озера и наиболее глубокие части заливов и бухт заняты отложениями lnH. В местах прохождения 20-м изобаты на поверхность выходят отложения lgIIIos, что, вероятно, является следствием очень малой мощности современного осадка или подводного размыва.

На берегах и в прибрежных частях дна нередко обнажаются моренные и флювиогляциальные отложения (gIIos, fgIIos). Кроме того, флювиогляциальные отложения слагают находящиеся на дне озера озы, один из которых прослеживается в Петрозаводской губе. Близ острова Суйсаари и на восточном берегу Заонежского залива наблюдаются ундаллювиальные отложения IvIII-IV. Также к северу от острова Суйсаари наблюдается выход коренных пород. Ниже (рис. 3) приведена схематическая карта строения четвертичных отложений для северной части Онежского озера, подготовленная совместно с А. Е. Рыбалко, Д. А. Субетто и Н. А. Белкиной.

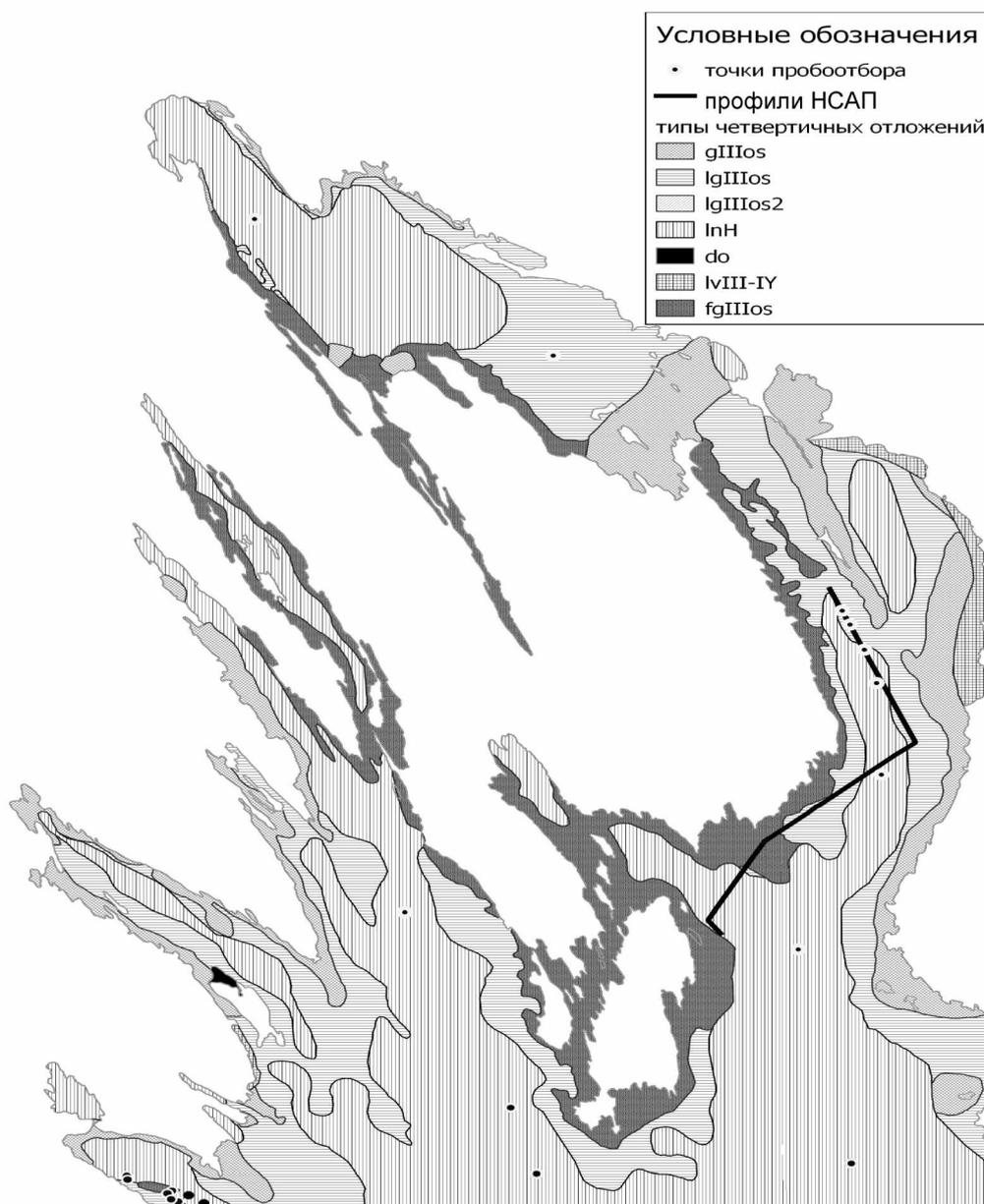


Рис. 3. Схематическая карта строения четвертичных отложений для северной части Онежского озера:

do – обозначение выходов коренных пород

Автор выражает благодарность экипажам НИС «Эколог» и «Профессор Зенкевич» за организацию технической части работ, ИВПС КарНЦ РАН за предоставление НИС и материалов для проведения работ, а также сотрудникам СПбГУ, МГУ и Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева за неоценимую помощь в работе.

Материалы для данной работы получены в ходе полевых исследований, проводимых в рамках грантов РФФИ 18-05-00303 (работы в Петрозаводской губе) и РНФ-18-17-00176 (работы в открытой части озера).

Список литературы

- Ладога* / под ред. В. А. Румянцева, С. А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 467 с.
- Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 490 с.
- Страховенко В. Д., Субетто Д. А., Овдина Е. А., Белкина Н. А., Ефременко Н. А., Маслов А. В.* Современные донные отложения Онежского озера: строение, минеральный состав и систематика редкоземельных элементов // Доклады академии наук. 2018. Т. 481, № 4. С. 414–417.
- Макарьев А. А., Погорельский А. И., Макарьева Е. М и др.* Геологическая съемка м-ба 1 : 500 000 дна Онежского озера (объект Онежский озерный). Ломоносов, 2002. 396 с.

STRUCTURAL FEATURES OF THE QUATERNARY DEPOSITS IN THE NORTHERN PART OF LAKE ONEGO ACCORDING TO THE RESULTS OF GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL STUDIES

P. Beliaev

FSBI “VNIIOkeangeologia”, St. Petersburg

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

In the period from 2016 to 2019, geological sampling, geophysical mapping and fixed-site drilling were carried out in Lake Onego within research projects on the Quaternary cover of European Great Lakes. Staff of VSEGEI, NWPI KarRC RAS, St. Petersburg State University and Moscow State University took part in the activities. In the course of this work, information about the structure of the Late Pleistocene-Holocene deposits in the basin of Lake Onego was obtained for the first time since the early 2000s. As the result, a sketch map of Quaternary sediments in the northern part of Lake Onego was compiled.

ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ РАДИОИЗОТОПНОГО ДАТИРОВАНИЯ ПО СВИНЦУ-210 В МЕРОМИКТИЧЕСКОМ ПРЕСНОВОДНОМ ОЗЕРЕ СВЕТЛОМ (СЕВЕР АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)

*В. М. Быков¹, Е. Ю. Яковлев¹, А. А. Очеретенко¹, К. Б. Данилов¹, А. В. Чунаков¹,
А. А. Чунакова¹, Г. В. Кудрявцев²*

¹ *Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н. П. Лаврова Российской академии наук, Архангельск*

² *Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск*

Изучение скоростей осадконакопления в водоемах на сегодняшний день достаточно актуально. Существует множество радиоизотопных методов для оценки осадконакопления, среди которых метод датирования ²¹⁰Pb является точным и используется для определения возраста. Основная цель работы – оценить скорость осадконакопления в меромиктическом озере Светлом. Проведенные исследования показывают, что при расчетах по двум моделям CRS и CIC имеются значительные различия. Модель CRS в отличие от модели CIC применима для расчета уплотнения донных отложений.

Оценка скоростей осадконакопления дает важную информацию о физико-химических процессах, происходящих в водных экосистемах. В частности, определение концентрации некоторых загрязняющих веществ и удельной активности природного радионуклида ²¹⁰Pb в профилях кернов донных отложений позволяет проследить историю и источники их загрязнения [Gelen et al., 2003].

Изотоп ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ года), продукт радиоактивного распада газообразного ^{222}Rn , выходящего с поверхности почвы в атмосферу, возвращается в течение нескольких недель на поверхность почвы или в водные резервуары в виде осадков.

Накопленная активность в результате процесса осаждения изотопа ^{210}Pb на земную поверхность называется избыточной и строго взаимосвязана со скоростями и механизмами данных процессов, в отличие от ^{210}Pb , образующегося внутри матрицы коренных отложений.

Существуют две модели, которые используются для определения датировок по ^{210}Pb при различных скоростях накопления отложений: модель постоянной начальной концентрации (CIC) и модель постоянной скорости поступления (CRS) [Ballestra, Hamilton, 1994; Hancock, Hunter, 1999; Sanchez-Cabeza et al., 1999].

Модель CIC предполагает, что повышенный поток осадочных частиц из водного столба будет удалять пропорционально избыточное количество ^{210}Pb из воды в отложения.

Модель CRS предполагает, что существует постоянное поступление ^{210}Pb из атмосферы в водоемы, что приводит к постоянной скорости поступления ^{210}Pb в отложения независимо от любых вариаций, которые могли бы происходить во время накопления отложений.

В России существует серия водных объектов, где давно применяется метод неравновесного ^{210}Pb для датировки донных отложений. Однако на Европейском Севере России в отечественной литературе встречаются немногочисленные данные по изучению скоростей осадконакопления в водоемах.

Первые оценки скоростей осадконакопления были проведены в Белом море И. К. Авилковым в 50-х гг. XX века на основании данных о мощности осадочных толщ в различных районах и бытовавших на тот момент представлений о возрасте дегляциации исследуемой территории (~6000 лет). Рассчитанные скорости осадконакопления варьировались от 1,7–3 см/1000 лет в центральных частях до 30–40 см/1000 лет в приустьевых районах заливов [Григорьев, 2017].

На Европейском Севере в центральной части бассейна Белого моря были впервые проведены радиохимические анализы по определению содержания природного изотопа ^{210}Pb . На основании полученных данных была рассчитана средняя скорость осадконакопления за последние 150 лет, которая составила 1,52 мм/год [Григорьев, 2017].

Данные по датированию донных отложений озер Архангельской области радиоизотопным ^{210}Pb методом практически отсутствуют или носят локальный характер, поэтому тема изучения скорости осадконакопления является актуальной. В настоящее время на территории Архангельской области известно небольшое количество озер меромиктического типа.

Начиная с декабря 1999 г. учеными Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаврова РАН проводятся исследования на меромиктическом оз. Светлом Архангельской области.

Озеро Светлое находится в Приморском районе Архангельской области на расстоянии 63 км на северо-восток от г. Архангельска. Оно является первым в системе из пяти озер, дающих начало р. Светлой (водосборный бассейн Белого моря). Озерная котловина сформирована двумя ямами, между которыми находится мелководный перешеек глубиной до 5 м, где располагается остров (рис. 1) [Кокрятская и др., 2019].

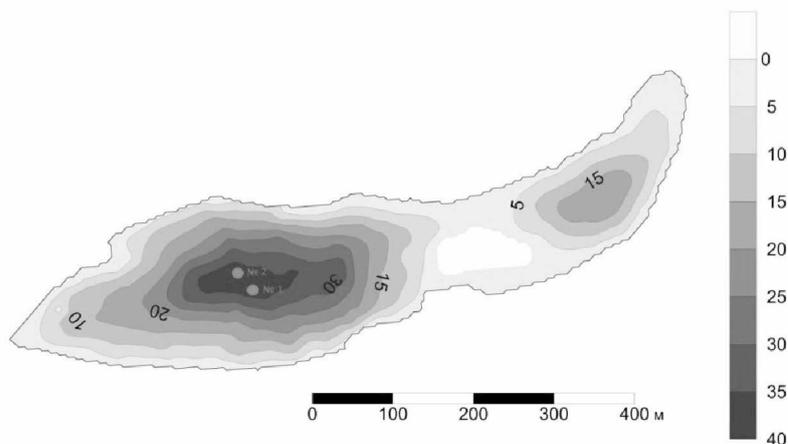


Рис. 1. Батиметрическая карта-схема оз. Светлого (север Архангельской области) [Кокрятская и др., 2019]

В восточной оконечности озера вытекает ручей шириной около 1,5 м и глубиной около 0,3 м, соединяющий его со следующим озером. Водосборная площадь озера 1,45 км², площадь акватории (без острова) 0,146 км², объем 0,00176 км³, максимальная глубина 39 м, средняя глубина 12 м. Большой вклад грунтовых вод в питание озера и малая заболоченность водосборной площади озер почвы представлены песчаными и подзолистыми на карбонатных отложениях [Кокрятская и др., 2019].

В геологическом строении можно выделить архейские, протерозойские, палеозойские и четвертичные отложения. Четвертичные отложения сплошным чехлом перекрывают толщи венда и палеозоя. Верхнечетвертичные отложения, имеющие наиболее широкое распространение, представлены осадками микулинского межледникового горизонта и валдайского надгоризонта.

Берега озера крутые и сформированы песчаником и ледниковыми отложениями; южный берег выше северного. Северный и южный берега озера образованы моренной грядой.

При изучении важнейших показателей на озере особое внимание уделяется термическому режиму, рН, удельной электропроводности, растворенному органическому и неорганическому углероду, биогенным элементам, сероводороду, сульфатам и сульфатредуцирующим бактериям. Датирование донных отложений альфа-бета-радиометрическим методом ²¹⁰Pb на оз. Светлом ранее не применялось, что дает возможность использовать его для определения скорости осадко-накопления.

Материалы и методы исследования

В связи с этим на оз. Светлом были отобраны две колонки донных отложений с помощью универсального пробоотборника для глубин до 40 м.

Отобранные пробы упаковывались в полиэтиленовые пакеты и маркировались, данные о пробах регистрировались в полевом журнале. В лабораторных условиях пробы высушивались до воздушно-сухого состояния. После этого пробы доводились до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105 °С, истирались в ступке и просеивались через сито с размером отверстий не более чем 0,125–0,25 мм.

Аналитические работы выполнялись по методике измерений удельной активности полония-210 (²¹⁰Po) и свинца-210 (²¹⁰Pb) в пробах почв, грунтов, донных отложений, горных пород и строительных материалов на их основе альфа-бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой, разработанной специалистами ФГУП «ВИМС».

Пробоподготовка осуществлялась в два этапа:

- 1) Извлекались радионуклиды в жидкую фазу, путем химической обработки;
- 2) Проводили электрохимическое выделение изотопов полония и свинца.

Измерение счетного образца выполнялось в лаборатории экологической радиологии ФГБУН ФИЦКИА РАН на альфа-бета радиометре РСК-01А «Абелия» не ранее, чем через 10 и не позднее чем через 36 часов после электрохимического выделения изотопов. Проводили не менее 5 последовательных наблюдений счетного образца с одинаковой продолжительностью (3600 с).

Результаты и их обсуждение

Две точки отбора оз. Светлого показаны на рис. 1 и расположены недалеко друг от друга. Координаты точек: N 65°04'59" E 41°06'36" и N 65°04'57" E 41°06'37". Первая колонка (колонка № 1) была отобрана 25 февраля 2014 г. с исследуемой мощностью керна 35 см, вторая (колонка № 2) – 18 апреля 2014 г. с исследуемой мощностью керна 30 см.

Однако на озере в связи с его конусообразной формой котловины и уникальным строением распределение ²¹⁰Pb происходит неравномерно. Это, в свою очередь, затрудняло датировку и отбор донных отложений.

В результате расчетов определялась измеренная удельная активность ²¹⁰Pb в колонках № 1 и № 2.

Содержание фонового А' (²¹⁰Pb) рассчитывалось как среднее измеренное значение А (²¹⁰Pb) в слоях (25–30) и (30–35) – в колонке № 1 (264 Бк/кг); (20–25) и (25–30) – в колонке № 2 (153 Бк/кг). При вычитании фонового значения из значений А (²¹⁰Pb) вышележащих слоев были получены концентрации избыточного над равновесным свинцом-210 (А (²¹⁰Pb)_{изб}).

Согласно модели постоянной скорости поступления (CRS) ^{210}Pb был рассчитан возраст в каждом слое. На основе полученных данных слой донных отложений в колонке № 1 между горизонтами (0–2) и (20–25) накапливался в течение 123 лет, в колонке № 2 между горизонтами (0–5) и (0–20) – около 34 лет.

В результате применения модели постоянной скорости поступления (CRS) донные отложения верхнего слоя (0–2) в колонке № 1 датируются 2010 г., остальная часть слоев сформировалась еще в XX веке. Стоит отметить, что в 1964–1978 гг. в колонке № 1, а также в 2000–2004 гг. – в колонке № 2 процесс осадконакопления шел быстро (рис. 2), что говорит непосредственно об их уплотнении.

Моделирование с помощью CRS требует глубокого знания вариации объемной плотности с глубиной. Поэтому эта модель отслеживает уплотнение и изменения уплотнения с глубиной колонки [Gelen et al., 2003].

В течение долгого времени поток ^{210}Pb не всегда поступал с постоянной скоростью и менялся вследствие климатических и антропогенных факторов. В связи с этим была применена модель постоянной начальной концентрации (CIC), которая показала иное распределение по возрастным категориям и является наиболее применимой.

С использованием модели постоянной начальной концентрации (CIC) была рассчитана средняя скорость осадконакопления в двух колонках, которая составила 0,65 мм/год.

Согласно этой модели был рассчитан возраст отложений. Колонка № 1 между горизонтами (0–2) и (20–25) образовалась приблизительно за 286 лет, практически аналогичный результат показало датирование колонки № 2, здесь донные отложения в интервале от (0–5) до (15–20) накопились ориентировочно за 250 лет (см. рис. 2).

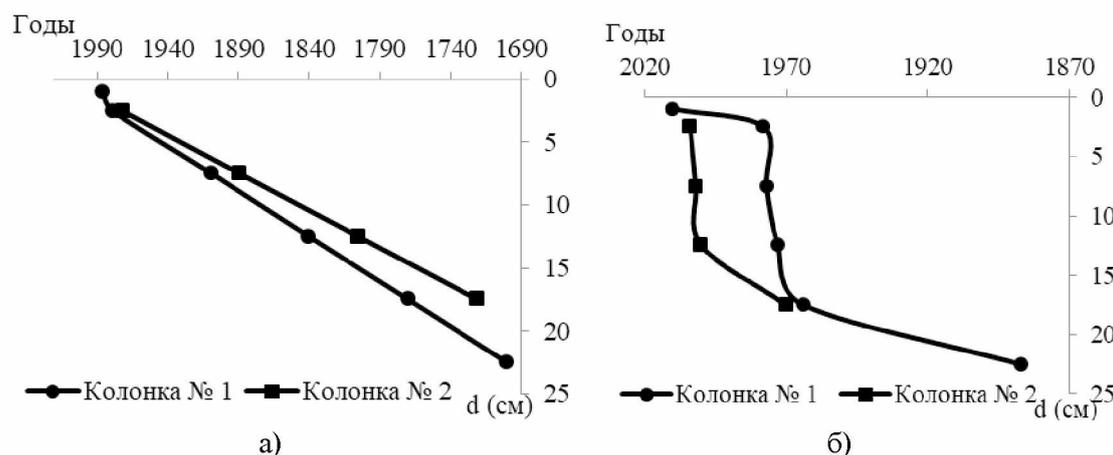


Рис. 2. Сравнение возраста в колонках донных отложений по радиоизотопному методу ^{210}Pb по модели постоянной начальной концентрации (а) и модели постоянной скорости поступления (б)

Выводы

- 1) Впервые проведена оценка скорости осадконакопления альфа-бета-радиометрическим методом ^{210}Pb в меромиктическом пресноводном оз. Светлом (север Архангельской области).
- 2) Оценка скорости осадконакопления в оз. Светлом (север Архангельской области) может дать важную информацию о физико-химических процессах, происходящих в водных экосистемах, а также позволяет проследить историю и степень загрязнения участков в определенный промежуток времени по слоям.
- 3) Средняя скорость осадконакопления в двух колонках составила 0,65 мм/год.
- 4) Быстрое осадконакопление в течение короткого промежутка времени по модели постоянной скорости поступления может объясняться возможным уплотнением донных отложений.

Список литературы

Григорьев В. А. Новые данные о современных скоростях осадконакопления в северной части Бассейна Белого моря // Морские исследования и образование (MARESEDU-2017) // Труды VI Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 302–305.

Кокрятская Н. М., Чупаков А. В., Тутова К. В., Чупакова А. А., Забелина С. А., Морева О. Ю., Неверова Н. В., Жибарева Т. А. Гидролого-гидрохимические характеристики меромиктического железомарганцевого пресноводного озера Светлое (Архангельская область) // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биология. 2019. Т. 12, № 2. С. 147–159.

Ballestra S., Hamilton T. Basic Procedures Manual Radiochemistry. IAEA-Marine Environment Laboratory, Monaco. 1994. P. 75–79.

Gelen A., Diaz O., Simon M. J., Herrera E., Soto J., Gomez J., Rodenas J., Beltran J., Ramirez M. ^{210}Pb dating of sediments from Havana Bay, J. Rad. I Nuclear // Chem. 2003. Vol. 256, N 3. P. 561–564.

Hancock G. J., Hunter J. R. Use of excess ^{210}Pb and ^{228}Th to estimate rates of sediment accumulation and bioturbation in Port Philip Bay, Australia // Mar Fresh. Wat. Res., 50. 1999. P. 533–545.

Sanchez-Cabeza J. A., Masque P., AniRagolta I., Merino J., Frignani M., Alvisi F., Palanques A., Puig P. Sediment accumulation rates in the southern Barcelona continental margin (NW Mediterranean Sea) derived from ^{210}Pb and ^{137}Cs chronology // Pro. Oceanogr. 1999. N 44. P. 313–332.

ESTIMATION OF SEDIMENTATION RATES IN THE MEROMICTIC LAKE SVETLOE (NORTHERN ARKHANGELSK REGION) USING ^{210}Pb DATING

V. Bykov¹, E. Yakovlev¹, A. Ocheretenko¹, K. Danilov¹, A. Chupakov¹,
A. Chupakova¹, G. Kudryavtsev²

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research (FCI Arctic), Arkhangelsk

² Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk

Research into sedimentation rates in water bodies is a topical issue. Multiple radioisotope-based techniques have been used to estimate sedimentation rates. The ^{210}Pb dating method is widely used to determine the age of sediments. The main goal of this work is to estimate the sedimentation rate in the meromictic Lake Svetloe. The results produced by the CRS and the CIC models differ significantly. Compared to the CIC model, the CRS model is applicable for calculating sediment compaction.

ФОСФОР В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Е. В. Гатальская, Н. А. Белкина

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

Изучены распределение фосфора в донных отложениях Иваньковского водохранилища и его состав в зависимости от размерной фракции осадка. Оценен экологический риск поступления фосфора из донных отложений во взвешенной и растворенной форме для разных динамических зон водохранилища.

Иваньковское водохранилище образовано в 1937 г. в результате перекрытия русла р. Волги у с. Иваньково плотиной гидроэлектростанции. Основным назначением водохранилища является сезонное регулирование стока р. Волги для бесперебойного снабжения водой системы каналов г. Москвы, через которую поступает около 70 % всей воды, потребляемой в настоящее время населением и промышленностью г. Москвы [Бреховских и др., 2006].

Одной из экологических проблем водохранилища является вторичное загрязнение биогенными элементами из донных отложений. Так, по оценкам С. П. Китаева, внутренняя фосфорная нагрузка в Иваньковском водохранилище составляет 83 % от внешней и оценивается в 1,664 г/м² в год [Китаев, 2007]. Донные отложения аккумулируют фосфор, поступающий главным образом с детритным материалом. Фосфор может возвращаться в воду в составе

взвешенного материала в результате взмучивания донных отложений или в растворенной форме в результате процессов разложения органического вещества, что способствует развитию процессов эвтрофирования. Несбалансированная эвтрофикация может приводить к бурному развитию водорослей и появлению в воде цианобактерий, которые в период цветения выделяют токсины, способные вызвать отравление людей и животных, а также приводит к дефициту кислорода, заморам рыб.

Пробы донных отложений были отобраны в 2018 г. на 6 станциях Иваньковского плеса, расположенных в разных динамических зонах, описанных ранее в работе В. Ф. Бреховских и др.: ст. 2 в зоне переноса, ст. 4, 10 – взмучивания, ст. 3, 8 – седиментации, ст. 6 – застойной [Бреховских и др., 2006]. Отбор проб проводили по стандартной методике дночерпателем Петерсона, проботборником Limnos, трубкой ГОИН [ПНДФ 12.1:2.2.2.2.3.2–03, 2003]. В донных отложениях исследовали гранулометрический состав. В соответствии с общепринятыми методами были определены потери при прокаливании (ППП₅₅₀), зольность, содержание общего и минерального фосфора ($P_{\text{общ}}$, $P_{\text{мин}}$) [Аринушкина, 1970]. В лабораторных условиях были выделены поровые воды (ст. 3, 6, 8), в которых впоследствии определяли содержание $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ фотометрическим методом Морфи и Райли [РД 52.24.382–2006, 2006].

Для анализа на содержание фосфора, мигрирующего в составе взвешенного вещества, на основе ГОСТа [ГОСТ 12536–2014, 2015] была разработана методика разделения донных отложений на размерные фракции. Были выделены фракции, подверженные взмучиванию: мелкопесчаная (\varnothing от 250 до 100 мкм), алевритовая (\varnothing от 100 до 50 мкм), глинистая (\varnothing от 50 до 1 мкм), коллоидная (\varnothing от 0,8 до 0,45 мкм). Частицы диаметром > 50 мкм разделялись методом ситования, глинистая фракция – методом суспензирования, коллоидная – фильтрованием.

Гранулометрический состав исследованных донных отложений Иваньковского водохранилища в основном представлен алевритовой и глинистой фракцией. Осадки можно отнести к минеральному типу, чему соответствуют высокий показатель зольности (80 %) и низкое значение ППП₅₅₀ (15 %) (табл.). Песчаная фракция преобладает в зоне переноса (ст. 2). Для зоны взмучивания характерны мелкопесчаные и илистые отложения (ст. 4, 10). Глинистая фракция преобладает в осадках зоны седиментации (ст. 3, 8) и в осадках застойной зоны (ст. 6) (см. табл.).

Гранулометрический и химический состав донных отложений поверхностного слоя (0–5 см) Иваньковского плеса, %

Фракция	Размер зерна, мкм	Станция					
		2	4	10	3	6	8
Песок	> 250	43,6	0	8,3	0	0	0
Мелкий песок	250–100	25,4	38,4	19,1	4,3	0,3	1,3
Ил	100–50	3,9	32	50,2	12,7	11,7	16,1
Глина	50–1	26,4	28,7	22	81,7	86,8	81,1
Коллоид	< 0,8	0,7	1,4	0,4	1,3	1,2	1,5
$P_{\text{общ}}$	%	0,617	0,151	0,124	0,341	0,606	0,257
$P_{\text{мин}}$	%	0,016	0,024	0,032	0,217	0,127	0,200
Зольность	%	85,84	90,55	75,30	78,42	76,54	75,08
ППП ₅₅₀	%	1,70	5,44	21,55	17,57	20,91	21,57

Диапазон содержания $P_{\text{мин}}$ (наиболее способная к обменным процессам форма) в донных отложениях достаточно широкий – от 0,016 % на ст. 2 до 0,217 % на ст. 3. Ранее было установлено, что песчаные фракции обладают наименьшей сорбционной способностью по отношению к фосфору, чем иловые и глинистые отложения [Третьякова и др., 2011; Белкина и др., 2019]. Это подтверждается результатами нашего исследования. Песчаная фракция преобладает на ст. 2, здесь же наблюдалось и наименьшее содержание $P_{\text{мин}}$. Глинистая фракция преобладает на станциях 3, 6, 8, здесь же отмечено наибольшее его содержание (см. табл.).

Максимальное значение $P_{\text{мин}}$ в донных отложениях наблюдалось на ст. 8 на глубине 4 см (0,224 %). Во всех исследованных осадках его содержание уменьшалось с глубиной. Картина распределения $P_{\text{общ}}$ в исследованных колонках идентична $P_{\text{мин}}$. Локальный максимум также наблюдается на ст. 8 на глубине 4 см (0,266 %) (рис. 1).

В поровых водах содержание $P_{\text{мин}}$ изменялось в широких пределах (1,9–216,9 мкг/л). Максимальное значение наблюдалось на ст. 6 на глубине 6 см. Распределение $P_{\text{общ}}$ также имеет неравномерный характер (рис. 2). Диапазон его концентраций достаточно широкий – от 16,8 до 364,6 мкг/л. Максимальное и минимальное значения отмечены на ст. 6 (на глубине 16 см и 6 см, соответственно). Минимальное значение $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ на ст. 3 наблюдалось в слое 15–20 см (1,9 мкг/л и 62,6 мкг/л, соответственно), максимальное значение зафиксировано в слое 5–10 см (159,0 мкг/л и 263,7 мкг/л, соответственно). Высокие градиенты концентраций свидетельствуют о возможности поступления фосфора из донных отложений в растворенном виде. На ст. 8 содержание $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ уменьшалось с глубиной в диапазоне 0–12 см (см. рис. 2). На участке 12–25 см концентрация обеих форм фосфора практически не изменялась, а в слое 25–30 см наблюдалось увеличение его значений (41,1 мкг/л и 231,9 мкг/л, соответственно) (см. рис. 2).

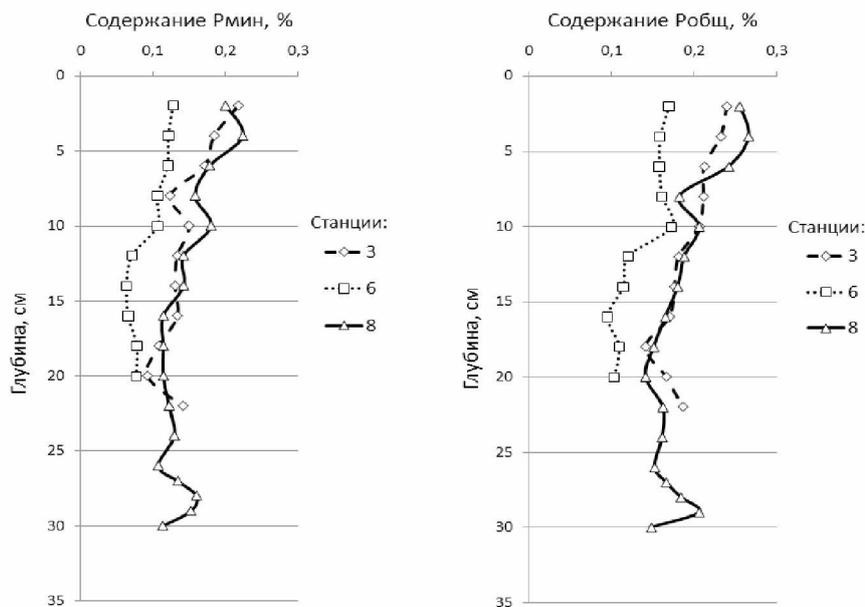


Рис. 1. Содержание $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ в донных отложениях Иваньковского плеса

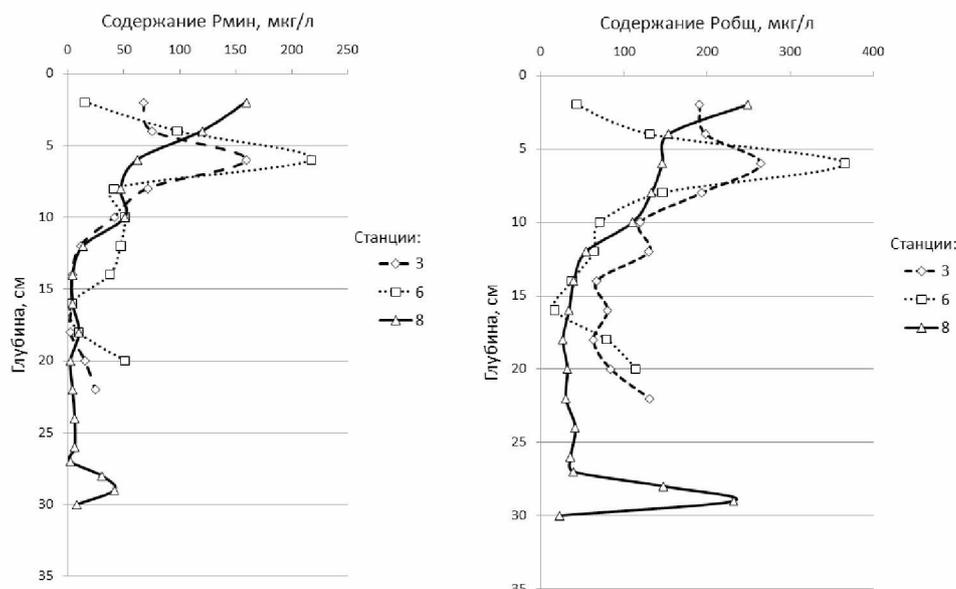


Рис. 2. Содержание $P_{\text{общ}}$ и $P_{\text{мин}}$ в поровых водах донных отложений

Содержание $P_{\text{общ}}$ в донных отложениях водохранилища изменяется от 0,12 (ст. 10) до 0,62 (ст. 2) (см. табл.). Большая его часть депонируется в глинистой фракции (\varnothing 50–10 мкм) с максимумом значения на ст. 6–0,834 % от $P_{\text{общ}}$. Минимальное содержание элемента наблюдается

в песчаной фракции ($100 < \varnothing < 250$ мкм), диапазон колебаний от 0,000 % (ст. 6, 4, 8, 3) до 0,04 % (ст. 2). Сравнение абсолютных концентраций фосфора, накопленного в каждой из выделенных фракций, показало, что на ст. 2, 10 наибольшее количество $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ содержится в коллоидной фракции (5,2 и 7,7 %, 1,6 и 3 %, соответственно). На ст. 3, 4, 6, 8 наибольшие концентрации $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{общ}}$ обнаружены во фракции $1 < \varnothing < 2$ мкм (2,6 и 2,7 %, 1,6 и 2,5 %, 3,9 и 4,7 %, 1,2 и 1,3 %, соответственно). Необходимо отметить, что высокое содержание фосфора в глинистой и коллоидной фракциях донных отложений указывает на потенциальную опасность вторичного загрязнения этим элементом при его поступлении из донных отложений обратно в воду в результате взмучивания осадка.

Таким образом, донные отложения Иваньковского водохранилища являются минеральными осадками с относительно высоким содержанием фосфора. Гранулометрический состав осадков соответствует песчаным отложениям на ст. 2, песчаным алевритам – ст. 4 и 10, глинистым алевритам – ст. 3, 6, 8. Максимальное содержание фосфора обнаружено в осадках застойной зоны. Поступление фосфора из донных отложений этой зоны водохранилища обратно в воду возможно как в растворенной (диффузионные потоки), так и во взвешенной форме (при определенной ветровой ситуации) в период открытой воды. Наиболее опасными зонами загрязнения взвешенным фосфором являются зоны взмучивания, особенно в период отмирания высшей водной растительности.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-45-100002.

Список литературы

- Аринушкина Е. В.* Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд. М.: МГУ, 1970. 488 с.
- Белкина Н. А., Казмирук В. Д., Потахин М. С.* Поступление фосфора из донных отложений Иваньковского водохранилища в составе взвешенного вещества // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы II Междунар. конф. Казань, 2019. С. 33–38.
- Бреховских В. Ф., Казмирук Т. Н., Казмирук В. Д.* Донные отложения Иваньковского водохранилища: состояние, состав, свойства. М.: Наука, 2006. 176 с.
- ГОСТ 12536–2014.* Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2015. 19 с.
- Китаев С. П.* Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 394 с.
- ПНДФ 12.1:2:2.2:2.3.2–03.* Отбор проб почв, грунтов, осадков биологических очистных сооружений, шламов промышленных сточных вод, донных отложений искусственно созданных водоемов, прудов-накопителей и гидротехнических сооружений. Методические рекомендации. М., 2003. 12 с.
- РД 52.24.382–2006.* Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом. Ростов-на-Дону, 2006. 26 с.
- Третьякова Е. И., Ильина Е. Г., Бурлуцкая Е. В.* Изучение факторов, влияющих на содержание фосфора в донных отложениях Новосибирского водохранилища // Известия АлтГУ. 2011. Т. 2, № 3. С. 132–137.

PHOSPHORUS IN BOTTOM SEDIMENTS IN IVANKOVSKOYE STORAGE RESERVOIR

E. Gatal'skaya, N. Belkina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

The distribution of phosphorus in bottom sediments of Ivankovskoye storage reservoir and its composition depending on the sediment size fraction was studied. The ecological risk of suspended and dissolved phosphorus being carried from the sediments to different dynamic zones of the reservoir was estimated.

ИЗМЕНЕНИЯ ДИАТОМОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ТУРГОЯК КАК ОТРАЖЕНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. В. Масленникова^{1,2}, В. О. Гулаков¹

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс

² Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск

Исследование посвящено палеолимнологической реконструкции этапов развития озера Тургояк с конца XIX века с помощью диатомового анализа колонки донных отложений. Установлены изменения диатомовых комплексов с начала XX века. Наибольшие трансформации отмечены начиная со второй половины XX века. Сделан вывод, что антропогенная эвтрофикация озера продолжается и в настоящее время.

Озеро Тургояк является одним из самых глубоких и чистых озер на Урале. При максимальной глубине 32 м запас воды в нем составляет более 500 млн м³ [Андреева, 1973]. Ухудшение экологического состояния оз. Тургояк фиксировалось еще с начала XX века [Сементовский, 1913]. С 21 января 1969 г. озеро внесено в список особо охраняемых территорий области и объявлено памятником природы, а с 11 июня 1981 г. вошло в состав Тургоякского ландшафтного лесопарка. Работы ученых Ильменского заповедника показали изменения качества воды в озере в различные периоды, а также указывали на ухудшение экологического состояния озера, в том числе и после присвоения озеру статуса памятника природы [Ткачев и др., 1997; Гаврилкина и др., 1998; Рогозин, 1998; Снытько Л. В., Снытько В. П., 2014]. Однако непрерывных исследований изменений состояния озера не проводилось. Определение динамики изменения озерной экосистемы возможно с помощью палеолимнологических исследований. Диатомовые водоросли являются важными индикаторами изменения состояния озер, поскольку реагируют на изменения гидрохимических и морфометрических параметров озера. Целью данного исследования было определение основных этапов развития озера Тургояк на основе диатомового анализа колонки донных отложений, накопленных с конца XIX века.

В апреле 2014 г. у северного побережья оз. Тургояк, напротив турбазы «Серебряные пески», на глубине 18,85 м стратометром С1 со льда была отобрана колонка озерных осадков мощностью 36 см [Дерягин, 2018]. Пробы донных отложений отбирались с интервалом 2 см. Обработка проб для приготовления препаратов и методика диатомового анализа подробно описаны в работах [Масленникова и др., 2014; Maslennikova, 2020]. Условные хронологические границы диатомовых зон определены на основе оценки скорости осадконакопления верхней части колонки (0,17 см в год) [Удачин и др., 2009]. Изменения диатомовых комплексов и границы диатомовых зон определены с помощью анализа главных компонент (РСА) в программе CANOCO 4.5 [Ter Braak, Smilauer, 2002]. Полученные координаты для разновозрастных образцов (sample score) в РСА-ординационном пространстве отображались в стратиграфическом порядке в виде (рис. 1) графиков в программе C2 [Juggins, 2016].

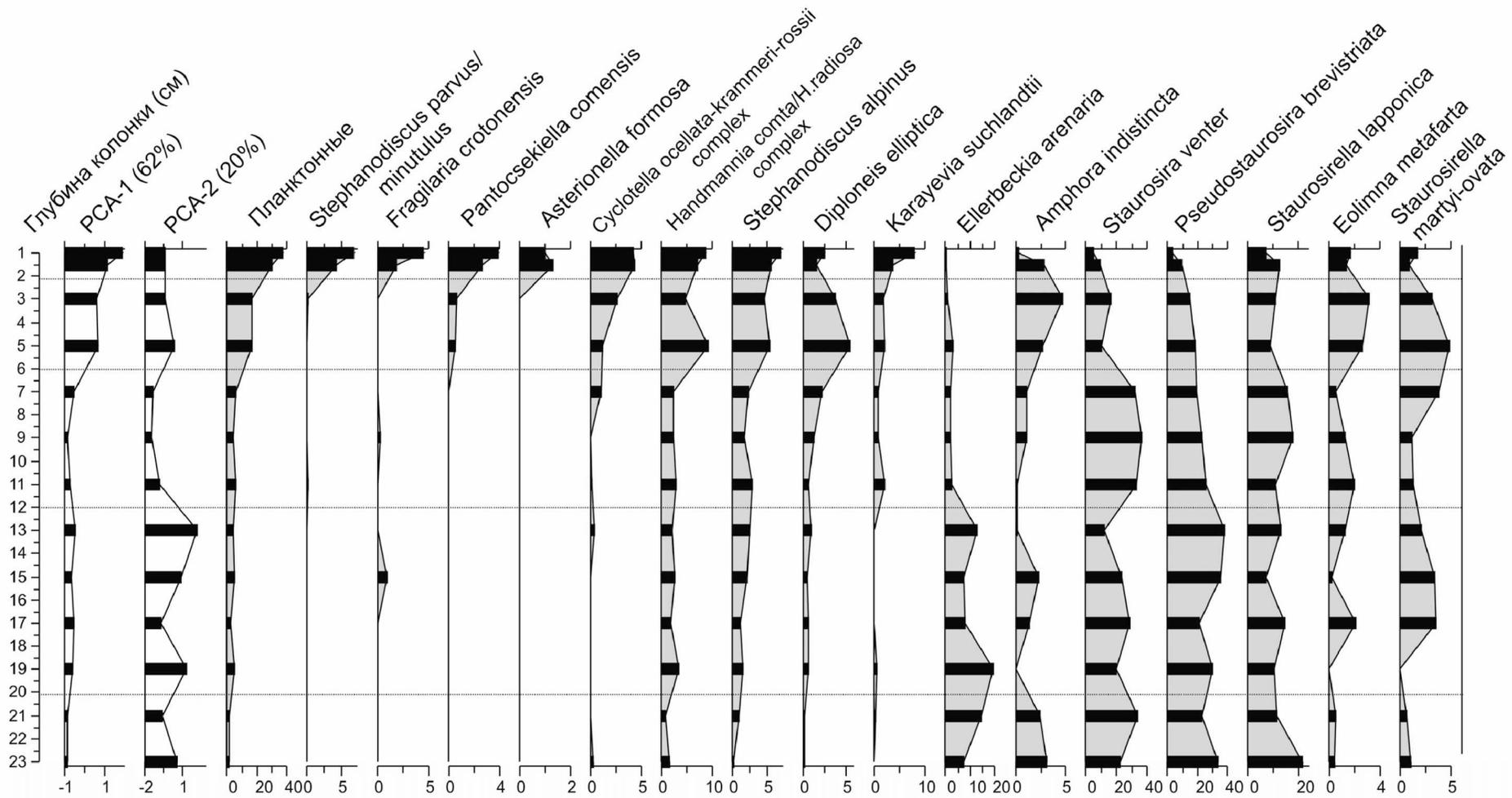
На основе анализа главных компонент, в который были включены 109 найденных видов диатомовых водорослей, выделено пять интервалов, соответствующих основным этапам изменения диатомовых комплексов.

Интервал 23–20 см (~1879–1896 гг.)

В диатомовом комплексе доминируют фрагиляриоидные диатомеи (*Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D. M. Williams & Round, *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J. D. Möller, *Staurosirella lapponica* (Grunow) D. M. Williams & Round) и *Ellerbeckia arenaria* (G. Moore ex Ralfs) R. M. Crawford.

Интервал 20–12 см (~1896–1949 гг.)

Состав доминантов не изменился, однако возросла роль планктонных диатомей, представленных видами комплекса *Handmannia comta* / *H. radiosa* [Genkal, 2013] и *Stephanodiscus alpinus* Hustedt in Huber-Pestalozzi. Повысилось участие *Eolimna metafarta* Kulikovskiy & Lange-Bertalot и *Staurosirella ovata* E. A. Morales in Morales & Manoylov. Изменения диатомового комплекса, вероятно, отражают начало антропогенного воздействия, которое заключалось в вырубке лесов вблизи озера и возрастании рекреационной нагрузки [Сементовский, 2013].



Изменения диатомовых комплексов колонки донных отложений оз. Тургояк

Интервал 12–6 см (~1949–1979 гг.)

Из состава доминантов исключается *Ellerbeckia arenaria*, уменьшается процент *Pseudostaurosira brevistriata*, возрастает роль мелких одношовных диатомей (*Karayevia suchlandtii* (Hustedt) Bukhtiyarova и *Planothidium* sp.) и *Staurosira venter*. Данный интервал соответствует периоду строительства микрорайона «Машгородок» (с 1955 г.), началу интенсивного водозабора вод для водоснабжения г. Миасс (с 1952 г.) и зарегулирования стока озера (1960 г.) [Гаврилкина и др., 1998].

Интервал 6–2 см (~1979–2002 гг.)

Установлено существенное возрастание процентного содержания планктонных диатомей, представленных видами комплексов *Cyclotella ocellata-krammeri-rossii* [Knie and Hübener, 2007], *Handmannia comta* / *H. radiosa*, а также *Stephanodiscus alpinus* и *Pantocsekiella comensis* (Grunow) K. T. Kiss & E. Ács. Снижается количество *Staurosira venter*, *Staurosirella lapponica*, зато существенно возрастает участие видов рода *Diploneis* (*D. elliptica* (Kützing) Cleve, *D. oculata* (Brébisson) Cleve и др.). Количество найденных видов и разновидностей диатомовых водорослей возрастает с 35 до 58. Данные изменения указывают на продолжение эвтрофикации водоема.

Интервал 2–0 см (~2002–2014 гг.)

Для данного интервала характерно существенное возрастание роли планктонных диатомей за счет мелких циклических видов: *Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve & Möller, *S. parvus* Stoermer & Håkansson, *Pantocsekiella comensis*, а также пеннатных *Fragilaria crotonensis* Kitton и *Asterionella formosa* Hassall, обычно предпочитающих высокие содержания биогенных элементов. Такие изменения свидетельствуют о продолжающихся неблагоприятных изменениях экологического состояния озера, несмотря на восстановление его проточности и уменьшение водозабора, что может объясняться влиянием сточных и канализационных вод многочисленных баз отдыха и продолжающейся застройкой берегов озера.

Таким образом, антропогенное воздействие фиксируется в диатомовой летописи с начала XX века. Наибольшие изменения произошли во второй половине XX века, что связано с зарегулированием стока озера, интенсивным водозабором, строительством микрорайона «Машгородок». Изменения начала XXI века свидетельствуют о продолжающемся эвтрофировании озера. Для более конкретных выводов и более точных хронологических границ требуется проведение дополнительных исследований, связанных с получением датированной летописи с более высоким разрешением.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-00040).

Список литературы

- Андреева М. А. Озера Среднего и Южного Урала. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1973. 272 с.
- Гаврилкина С. В., Кораблева О. Е., Митюхляев Д. В., Rogozin A. G., Танаева Г. В., Ткачев В. А., Шиманский Л. И. Экология озера Тургояк. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 1998. 154 с.
- Дерягин В. В. Стратификация донных отложений у северного и южного побережий озера Тургояк (Южный Урал) // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Челябинск, 26–28 сентября 2018 г.). Челябинск, 2018. С. 94–100.
- Масленникова А. В., Удачин В. Н., Дерягин В. В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2014. 136 с.
- Rogozin A. G. Сравнительная сапробиологическая характеристика озер Тургояк и Большое Миассово // Известия Челябинского научного центра. 1998. № 1. С. 75–81.
- Сементовский В. Н. Жемчужина Южного Урала. Озеро Тургояк // Природа и люди. 1913. № 15. С. 225–228.
- Снытько Л. В., Снытько В. П. Индикаторная роль фитопланктона в оценке многолетних изменений качества вод озер Большое Миассово и Тургояк (Южный Урал) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 2. С. 209–217.
- Ткачев В. А., Rogozin A. G., Гаврилкина С. В., Миронов Б. А., Гордиенко Н. С., Митюхляев Д. В., Кривошолова Т. Ф., Танаева Г. В. Состояние экосистем оз. Тургояк. Проблемы экологии и экологического образования в Челябинской области. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 1997. С. 64–65.
- Удачин В. Н., Дерягин В. В., Китагава Р., Аминов П. Г. Изотопная геохимия донных отложений озер Южного Урала для оценки масштабов горнопромышленного техногенеза // Вестн. Тюменского гос. ун-та. 2009. № 3. С. 144–149.
- Genkal S. I. Morphological variability, taxonomy, and ecology of species of the complex *Handmannia comta* / *H. radiosa* (Bacillariophyta) // International Journal on Algae. 2013. Vol. 15, N 4. P. 331–354.
- Juggins S. C2 Version 1.7. 2016. Unpublished program available at: <https://www.staff.ncl.ac.uk/stephen.juggins/software/C2Home.htm>

Knie M., Hübener T. Morphological variability of the *Cyclotella ocellata-krammeri-rossii* complex in field samples and cultures // Proceedings of the 1st Central European Diatom Meeting. Botanic Garden and Botanical Museum Berlin-Dahlem, Freie Universität Berlin, 2007. P. 83–86.

Maslennikova A. V. Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia // Journal of Paleolimnology. 2020. Vol. 63, N 2. P. 129–146.

Ter Braak C. J. F., Smilauer P. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Ithaca: Microcomputer Power, 2002. 500 p.

LAKE TURGOYAK DIATOM ASSEMBLAGES CHANGES IN RESPONSE TO HUMAN IMPACT

A. Maslennikova^{1, 2}, V. Gulakov¹

¹ South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology, Ural Branch RAS, Miass

² South Ural State University, Chelyabinsk

Paleolimnological research was focused on Lake Turgoyak sediment record. Diatom analysis of the sediments made it possible to identify the main stages in the evolution of the lake since the late 19th century. The greatest changes in diatom assemblages were determined for lake sediments deposited since the second half of the 20th century. It was concluded that the anthropogenic eutrophication of the lake continues still today.

МЕТАН В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВЫГОЗЕРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

И. В. Морозова¹, Н. А. Белкина¹, М. С. Потахин¹, З. И. Слуковский²

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,

ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

² Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

Исследован гранулометрический и химический состав донных отложений Выгозерского водохранилища. Проведено определение содержания метана в надильной воде и донных отложениях методом парофазного анализа и выявлены особенности его распределения в разных районах водохранилища.

Метан является вторым по значимости парниковым газом. До последнего времени считалось, что парниковый эффект от метана в 25 раз сильнее, чем от углекислого газа. Однако теперь Межправительственная группа экспертов по изменению климата ООН (IPCC) утверждает, что «парниковый потенциал» метана еще опаснее, чем оценивалось раньше. В расчете на 100 лет парниковая активность метана в 28 раз сильнее, чем у углекислого газа, а в 20-летней перспективе – в 84 раза, поэтому даже небольшие изменения концентрации метана могут значительно повлиять на климат Земли. Источники поступления метана в атмосферу разделяют на две большие группы: естественные и антропогенные. Важнейшим естественным источником эмиссии метана в атмосферу являются водоемы. Биогеохимический цикл метана в водоемах состоит из двух ключевых процессов: образование метана – метаногенез (строго анаэробный процесс) и окисление метана – метаноокисление (может быть как анаэробное, так и аэробное), происходящих при участии различных групп микроорганизмов. Биогенный метан образуется современным микробным сообществом преимущественно в осадочных отложениях, лишь небольшое количество газа образуется в водной толще, в так называемых анаэробных микроустьях [Леин, Иванов, 2009].

Водохранилища являются пресноводными водоемами и вносят свой вклад в круговорот метана на Земле. Например, эмиссия метана в Череповецкой зоне Рыбинского водохранилища составляла < 0,1–800 мл СН₄/(м²*сут) [Дзюбан, 2009].

Выгозерское водохранилище – одно из крупнейших в России, находится в Сегежском районе Республики Карелия. Площадь водной поверхности 1159 км² (при отметке над урвнем

моря 89,2 м), общая площадь (с островами) 1285 км², объем при НПУ 6,44 км³, полезный объем 0,7 км³ [Озера Карелии, 2013].

Отбор проб донных отложений (ДО) проводился гравитационной трубкой (модифицированный вариант стратометра Алекссонсона [Nakanson, Jansson, 1983]) на трех станциях, расположенных в различных районах Выгозерского водохранилища в 2017 г., которые были выделены в соответствии с морфологией котловины и динамикой вод: Юго-восточный район – затопленные устьевые участки рек Верхний Выг и Вожма, оз. Бобровое (ст. 1706), Центральный – глубоководная часть, дно оз. Выгозеро до затопления (ст. 1715), Северный – зона влияния р. Сегежи и сточных вод Сегежского ЦБК (ст. 1721) [Белкина, 2014, 2015].

Определение содержания метана проводили методом парофазного анализа, согласно аттестованным методикам [РД 52.24.512-2012; РД 52.24.511-2013]. В ДО определялся гранулометрический состав, pH, Eh, ППП₁₅₀, содержание C_{орг}, N_{орг}, P_{мин}, P_{общ}, зольность [Аринушкина, 1982].

Изученные ДО являются песчаными алевритами коричневого цвета (Юго-восточный и Центральный районы) и черного цвета (Северный район). Алевритовая фракция составляет в среднем 55 % – ст. 1706 и 56 % – ст. 1715 и 1721, соответственно. Большая доля песчаной фракции (в среднем 45 %, 47 % и 44 % – ст. 1706, 1715 и 1721) свидетельствует о продолжающихся абразионных процессах, особенно в северной части, где в отличие от донных отложений других районов в поверхностном слое присутствует фракция крупного песка (Ø 0,5–2,0 мм; от 0,06 до 5 %) (табл. 1). В центральной части водохранилища эта фракция обнаружена в нижележащих слоях (11–12 см и 21–22 см), ее содержание оказалось самым высоким (1–2 % и 5–9 %, соответственно). В ДО всех исследованных станций преобладали частицы размером 0,25–0,01 мм. Средняя скорость седиментации для Выгозерского водохранилища, оцененная по мощности слоя коричневого ила, составила 13 мм/год, 9 мм/год и 10 мм/год для ст. 1706, 1715 и 1721, соответственно [Потахин и др., 2018].

Данные химического состава ДО представлены в табл. 2, 3.

Таблица 1. Гранулометрический состав донных отложений Выгозерского водохранилища

Район озера, № станции	h, см	Размер частиц, мм							
		2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	< 0,005
Юго-восточный район ст. 1706	1–2	0,00	2,81	12,88	27,84	25,48	27,58	3,22	0,19
	11–12	0,00	0,00	8,33	38,43	20,59	26,65	5,76	0,25
Центральный район ст. 1715	1–2	0,00	0,00	2,60	37,42	24,34	30,29	5,17	0,19
	11–12	1,04	5,20	12,12	29,72	22,83	24,27	4,03	0,20
	21–22	2,48	8,64	13,73	25,93	19,38	24,17	4,25	0,19
Северный район ст. 1721	1–2	0,45	5,46	10,80	22,52	21,67	35,19	3,72	0,18
	11–12	0,06	3,98	12,81	31,34	20,04	27,01	4,54	0,23

Таблица 2. Химический состав донных отложений Выгозерского водохранилища

Район озера, № станции	h, см	C, %	ППП, %	N _{орг} , %	Fe, %	P _{мин} , %	P _{общ} , %	Зольность, %
Юго-восточный район ст. 1706	1–2	18,3	44,0	0,009	13	0,15	0,21	54,2
	11–12	19,8	44,8	0,009	7	0,12	0,17	52,5
Центральный район ст. 1715	1–2	18,4	46,1	0,008	19	0,17	0,21	52,1
	11–12	19,4	43,4	0,008	7	0,10	0,14	53,6
	21–22	18,8	41,0	0,008	7	0,08	0,12	56,3
Северный район ст. 1721	1–2	17,8	40,4	0,008	11	0,16	0,21	57,4
	11–12	17,1	34,6	0,007	7	0,12	0,16	62,4

Таблица 3. Физико-химические условия и содержание метана в донных отложениях Выгозерского водохранилища

Район озера, № станции	h, см	Содержание метана, мкг/г с.о.	Eh, mv	pH	d (г/см ³)
Юго-восточный район ст. 1706	1–2	0,30	–75	7,84	1,02
	11–12	0,38	59	7,01	1,06
Центральный район ст. 1715	1–2	0,10	8	7,56	1,02
	11–12	2,28	64	7,14	1,06
	21–22	2,36	35	6,96	1,09
Северный район ст. 1721	1–2	0,06	75	6,88	1,01
	11–12	0,32	11	6,50	1,07

Донные отложения Выгозерского водохранилища отличались высоким содержанием органического углерода (17–20 %) (см. табл. 2). По величине рН осадки верхних слоев Юго-восточного и Центрального районов соответствовали слабощелочным (рН 7,56–7,84), слой 11–12 см Северного района – кислым (6,50), в остальных слоях – нейтральным (6,88–7,14) (см. табл. 3). Окислительно-восстановительный потенциал грунтов на всех станциях < 75 мВ, в поверхностном слое станции 1706 – опускался до отрицательных значений. Количество Fe повышено в верхних горизонтах (слои 1–2 см) на всех трех станциях (11–19 %), в глубь ила снижалось. Ранее в ДО разных районов Выгозерского водохранилища было определено высокое содержание серы: 0,32–0,35 % в Юго-восточном и Центральном районах, особо высокий уровень – 0,79 % отмечен в Северном районе водохранилища [Куликова и др., 2015].

Метан установлен во всех пробах, отобранных из ДО, в концентрациях от 0,06 до 2,36 мкг/г (см. табл. 3). В поверхностных пробах (1–2 см) донных осадков содержание метана варьировало от 0,06 до 0,30 мкг/г. Максимальное содержание метана в поверхностном горизонте (1–2 см) было обнаружено в Юго-восточной части водоема – 0,30 мкг/г. Осадки этого района формируются под влиянием стока высокогумусных рек Верхний Выг, Вожма, Тянуksма. По данным литературы более высокое содержание метана в районах впадения рек и в целом в речных плесах относительно открытых участков обусловлено активным осаждением здесь органических веществ (ОВ) речных вод, как правило, более теплых и насыщенных метаном [Гарькуша и др., 2014]. Низкие концентрации CH₄ были установлены в Северной – 0,06 мкг/г и Центральной – 0,10 мкг/г частях акватории Выгозерского водохранилища. Общей тенденцией для всех исследованных станций является четкая закономерность увеличения концентраций метана с глубиной опробования. В целом содержание метана в нижних горизонтах было выше, чем в поверхностном слое осадков, в 1,3–24 раза. Зона повышенных значений метана находится в Центральной части Выгозерского водохранилища, в слоях донных осадков 11–12 и 21–22 см. Факт обнаружения высоких концентраций метана в этой части водохранилища свидетельствует об активности протекания процесса метаногенеза в ДО и о миграции газа из нижележащих слоев, сформированных в период образования водохранилища. Известно, что в Центральной части водохранилища в 1970-е гг. преимущественно осаждались продукты эрозии затопленных болотных торфяников, концентрации ОВ в которых достигали 80 % [Белкина, 2015].

Некоторое влияние на концентрацию метана в ДО будет оказывать их уплотнение, как это наблюдалось, например, в почвах [Гарькуша и др., 2018]. Плотность осадков возрастает с глубиной опробования на всех исследованных станциях, что затрудняет миграцию метана вверх по колонке. В Северной части водохранилища в осадках содержится больше крупных частиц, с глубиной повышается доля песчаной фракции, при этом доля алевритовой практически не меняется, осадки более рыхлые, в подповерхностных слоях плотность ДО самая низкая, содержание метана в этом районе минимально как в поверхностных, так и в подповерхностных слоях. Известно, что восстановительная обстановка в диагенезе способствует активному протеканию сульфатредукции и осернению исходного ОВ. В процессе бактериальной сульфатредукции происходит восстановление изотопов серы до серы органической, сульфидов и сероводорода. На восстановление сульфатов расходуется какая-то часть ОВ, его потери на сульфатредукцию прямо пропорциональны образовавшемуся количеству метана [Леин, Иванов, 2009]. В Северном Выгозеро условия для протекания сульфатредукции наиболее благоприятны, так как это зона аккумуляции сточных вод ЦБК, обогащенных серосодержащими органическими соединениями и, соответственно, генерация метана в этом районе снижена.

Донные отложения являются основным источником поступления метана в водную толщу [Федоров и др., 1999; Дзюбан, 2009; Гарькуша и др., 2014; Гречушникова и др., 2019]. Содержание метана в надильной воде на всех станциях оказалось менее 0,01 мкл/л, что связано с низкой диффузией газа из ДО, концентрация газа в поверхностных слоях которых достаточно низкая, и последующим распределением CH₄ по большому объему вод.

Таким образом, исследование содержания метана в ДО Выгозерского водохранилища показало, что в поверхностном слое осадков (1–2 см) концентрация газа выше в слабощелочных осадках Юго-восточного района (0,30 мкг/г) с восстановительными условиями. Донные отложения Северного района – это в основном осадки антропогенного происхождения с неоднородным гранулометрическим составом, имеющие кислую реакцию среды, в них преобладают процессы сульфатредукции, концентрация CH₄ здесь самая низкая (0,06 мкг/г). На всех станциях количество метана значительно увеличивается с глубиной. Максимальное возрастание концентрации газа от поверхностных к нижележащим слоям обнаружено в ДО Центрального района водохранилища (0,10–2,36 мкг/г), обусловлено

большей интенсивностью метаногенеза в глубинных слоях и миграцией метана из нижележащих слоев вверх по колонке ДО. Превращение оз. Выгозеро в водохранилище привело к изменению окислительно-восстановительных условий, разрушению сложной естественной (преимущественно аэробной) структуры бактериобентоса и превалированию там анаэробных групп, в частности метаногенов. Накопление в донных отложениях метана – продукта анаэробного распада ОВ – свидетельствует о превращении отложений в очаг вторичного загрязнения экосистемы, а также в источник поступления этого парникового газа в атмосферу и требует дальнейшего изучения.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-45-100002.

Список литературы

- Аринушкина Е. В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1982. 490 с.
- Белкина Н. А.* Донные отложения Выгозерского водохранилища // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 247–256.
- Белкина Н. А.* Ретроспективная оценка состояния донных отложений Выгозерского водохранилища // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 3. С. 270–279.
- Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С.* Метан в почвах Европейской России // Известия РАН. Сер. Геогр. 2018. № 13. С. 47–55.
- Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С.* Пространственно-временные закономерности распределения содержания метана в водохранилищах // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, № 1. С. 450–466.
- Гречушников М. Г., Ломова Д. В., Ломов В. А., Кременецкая Е. Р., Ефимова Л. Е., Репина И. А.* Эмиссия метана на границах «вода – донные отложения» и «вода – атмосфера» в слабопроточном долинном водохранилище // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. науч. тр. 2019. С. 327–331.
- Дзюбан А. Н.* Метан в донных отложениях Череповецкой зоны Рыбинского водохранилища и оценка его микробиологической трансформации и эмиссии // Гидробиологический журнал. 2009. Т. 45, № 6. С. 36–42.
- Куликова Т. П., Калинин Н. М., Березина Н. А., Сидорова А. И.* Эколого-токсикологическая характеристика сточных вод Сегежского ЦБК, природных вод и донных осадков // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 258–264.
- Леин А. Ю., Иванов М. В.* Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
- Озера Карелии.* Справочник / под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Потахин М. С., Белкина Н. А., Слукровский З. И., Новицкий Д. Г., Морозова И. В.* Изменение донных отложений Выгозера в результате многофакторного антропогенного воздействия // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 3(48). С. 107–117.
- РД 52.24.511-2013.* Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохим. ин-т, 2013. 19 с.
- РД 52.24.512-2012.* Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохим. ин-т, 2012. 23 с.
- Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н., Хорошевская В. О.* Метан в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища: распределение и биогеохимические особенности образования // Деп. в ВИНТИ РАН 02.06.99. N 1756-В-99. Ростов-на-Дону, 1999. 82 с.
- Håkanson L., Jansson M.* Principles of lake sedimentology. Berlin, 1983. 316 p.

METHANE IN BOTTOM SEDIMENTS OF VYGOZERSKOYE STORAGE RESERVOIR

I. Morozova¹, N. Belkina¹, M. Potakhin¹, Z. Slukovskii²

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

² Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

The grain-size distribution and chemical composition of bottom sediments in Vygozerskoye reservoir were investigated. The content of methane in supernatant water and sediments was determined by vapor phase analysis, and the patterns of its distribution across the reservoir were revealed.

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ТОРОСЪЯРВИ

Н. А. Мясникова

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

Комплексное исследование разрезов донных отложений водоемов является одним из способов изучения палеоклиматической и палеогеографической изменчивости, без которого невозможны понимание современных климатических изменений и их правильная оценка. В работе приводятся результаты краткого литостратиграфического описания и гранулометрический состав донных отложений озера Торосъярви (Медвежьегорский район Республики Карелия). Установлено, что на исследуемом участке размеры фракций изменяются от мелких песков до тонких глин. Донные отложения представлены, главным образом, фракцией крупного ила. Предварительный анализ динамики осадконакопления в озере Торосъярви предполагает пять смен динамических режимов вод в процессе его формирования.

Важной задачей исследования озер, и в первую очередь донных отложений, является детальное изучение изменений природно-климатических обстановок в прошлом. Данные, полученные при комплексном анализе колонок донных отложений, дают необходимые сведения для геомониторинга. Палеолимнологические исследования в данном случае являются единственным источником информации о внешних воздействиях на озерную экосистему в прошлом. При этом стратиграфия донных отложений озер обеспечивает, кроме детальной истории внешнего наземного и атмосферного воздействия, также и биологическую запись отклика озерной экосистемы на природно-климатические изменения.

Объектом исследования послужило оз. Торосъярви, расположенное в Медвежьегорском районе Республики Карелия. Озеро Торосъярви относится к бассейну Белого моря и находится в верхней части водосбора р. Выг (Беломорско-Балтийский канал) (рис. 1), в пределах Западно-Карельской возвышенности.

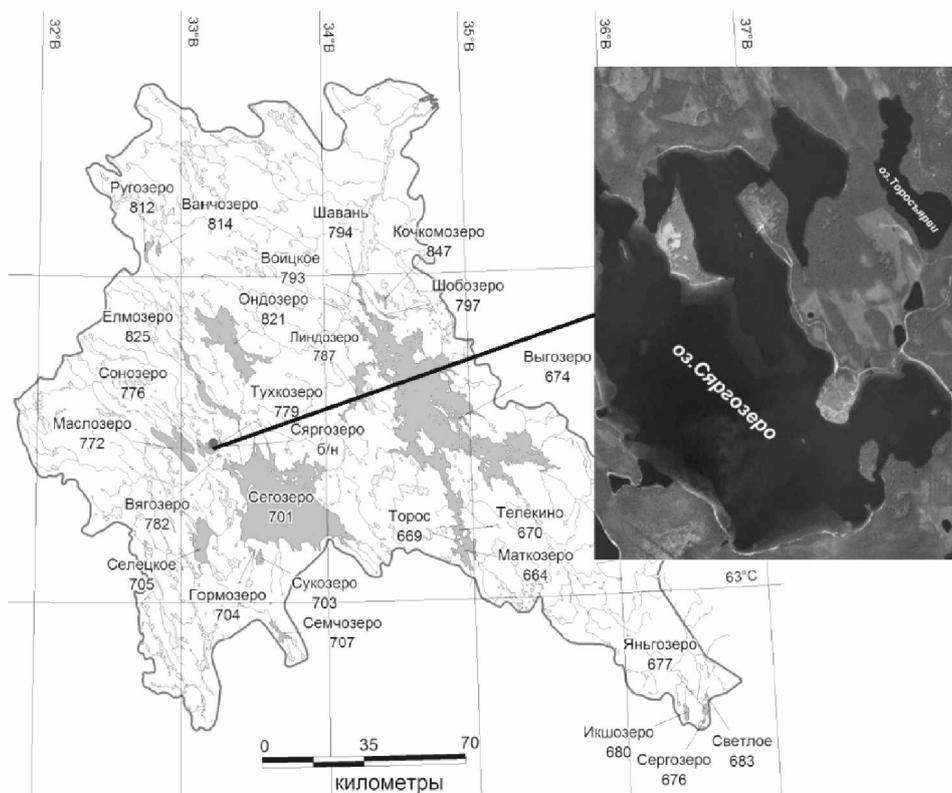


Рис. 1. Бассейн Беломорско-Балтийского канала [Озера Карелии, 2003]
(красной точкой обозначено расположение оз. Торосъярви)

Для изучения этапов развития озерного седиментогенеза и изменения климата голоцена проводилось бурение с помощью ручного торфяного бура оз. Торосъярви в двух точках. Координаты 1 точки отбора (кern 1.1): 63°29'3" с.ш. и 33°14'11" в.д. Н = 3,8 м. h = 120,4 м над уровнем моря (н.у.м.). Координаты 2 точки отбора (кern 2,1–2,5): 63°29'49" с.ш. и 33°13'40" в.д. Н = 2,5 м. h = 120,4 м н.у.м.

В процессе исследования выполнено морфологическое обследование озерной котловины и проведена батиметрическая съемка водоема. Для отбора колонки донных отложений в весеннее время со льда использовался штанговый торфяной бур. В ходе полевых работ были вскрыты донные отложения мощностью до 2,9 м.

По результатам анализа колонки донных отложений было установлено, что с глубиной сначала происходит уменьшение алевритовой фракции за счет увеличения фракции песка и появления фракции глины (переход от интервала 4,68–4,69 м к 4,71–4,72 м). Далее следует увеличение алевритовой фракции с одновременным исчезновением фракции глины и уменьшением песчаной фракции (переход от интервала 4,74–4,75 к 4,76–4,77 м). С глубины 4,8 м происходит увеличение алеврита с появлением фракции глин и песка. Например, содержание алевритовой фракции в слое 4,8–4,81 м составляет 88,2 %, фракции песка – 9,0 %, фракции глины – 2,8 %, в слое 5,04–5,05 м алевритовая фракция составляет 91,3 %, фракция песка – 8,8 %, в слое 5,14–5,15 м алевритовая фракция – 91,5 %, фракция песка – 8,5 %, а в слое 5,24–5,25 м алевритовая фракция – 90,4 %, фракция песка – 8,7 %, фракция глины – 1,0 %.

В ходе исследования оз. Торосъярви был выполнен гранулометрический анализ донных отложений десяти проб с глубины 4,68–5,35 м. Процентное содержание фракций в каждой пробе приведено в табл. Классификация фракций донных отложений по размерам частиц выполнена по В. Д. Ломтадзе [Ломтадзе, 1984]. Результаты гранулометрического анализа донных отложений оз. Торосъярви демонстрируют преобладание фракции крупных илов (0,01–0,05 мм), составляющей от 49 до 63 %. Фракция песка представлена мелкими песками (0,1–0,25 мм) от 5 до 12 % и тонкими песками (0,05–0,1 мм) от 21 до 39 %. Фракция глины встречается не во всех интервалах отбора и составляет около 1 %.

Фракционный состав поверхностных проб донных отложений оз. Торосъярви

Фракция	Размер фракции, мм	Содержание фракции, %									
		4,68–4,69	4,71–4,72	4,74–4,75	4,76–4,77	4,78–4,79	4,80–4,81	5,04–5,05	5,14–5,15	5,24–5,25	5,34–5,35
Пески средние	0,25–0,5	0	0	0,07	0	0	0,45	0	0	0,01	0
Пески мелкие	0,1–0,25	4,65	9,00	12,47	7,37	12,34	8,54	8,76	8,50	8,65	12,37
Пески тонкие	0,05–0,1	32,40	30,18	21,36	34,24	38,62	25,00	33,62	32,20	27,68	32,90
Илы крупные	0,01–0,05	62,96	50,74	52,85	58,38	49,04	54,53	57,63	59,30	61,24	54,73
Илы мелкие	0,002–0,01	0	7,56	10,50	0	0	8,64	0	0	1,47	0
Глины грубые	0,001–0,002	0	1,13	1,20	0	0	1,23	0	0	0,55	0
Глины тонкие	< 0,001	0	1,37	1,55	0	0	1,61	0	0	0,44	0

Все осадки по степени сортировки, согласно классификации П. Траска [Trask, 1932], можно подразделить на хорошо отсортированные ($S_0 = 1,0–1,58$), средне сортированные ($S_0 = 1,58–2,12$) и плохо сортированные ($S_0 > 2,12$).

Для расчета коэффициента сортировки (S_0), коэффициента асимметрии (S_k) и коэффициента К были построены кумулятивные кривые (рис. 2). Построение кумулятивных кривых и нахождение коэффициентов выполнено с использованием методики С. А. Коваль и Г. В. Войцеховского [Коваль, Войцеховский, 2001]. Донные отложения изученного участка керна (с глубины 4,4–5,4 м) являются в основном плохо сортированными осадками (коэффициент сортировки S_0 изменяется от 2,21 до 2,51). Пробы донных отложений интервала 4,68–4,69 м ($S_0 = 2,0$) и 5,24–5,25 м ($S_0 = 2,09$) относятся к средне сортированным осадкам.

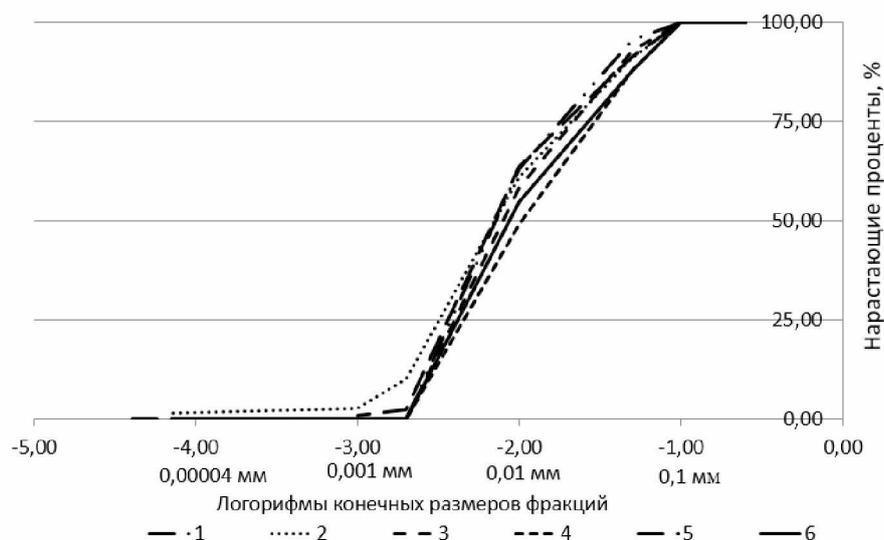


Рис. 2. Диаграмма кумулятивных кривых образцов проб донных отложений оз. Торосъярви: интервал отбора, м: 1. 4,68–4,69; 2. 4,71–4,72; 3. 4,76–4,77; 4. 4,78–4,79; 5. 5,24–5,25; 6. 5,34–5,35

Проведение работ по мониторингу водных объектов приводит к значительному накоплению данных, позволяющих оценить и охарактеризовать состояние водоема и возможность предсказать его дальнейшее развитие.

Исследования образцов проб донных отложений оз. Торосъярви выявили преобладание в них крупноалевритовой фракции, содержание которой колеблется от 49,04 до 62,96 %. Содержание песчаной фракции – от 21,36 до 38,62 %, представлено в основном тонкозернистой фракцией. Глинистая фракция – от 0,44 до 1,61 %.

Вычисленные на основе графиков кумулятивных кривых коэффициенты сортировки осадочного материала показали низкий уровень сортировки донных отложений в большинстве исследуемых образцов.

Предварительный анализ динамики осадконакопления в керне на интервале 4,4–5,4 м оз. Торосъярви предполагает пять смен динамических режимов вод в процессе его формирования.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 18-45-100002.

Список литературы

- Коваль С. А., Войцеховский Г. В.* Компьютерная обработка результатов гранулометрического анализа и их генетическая интерпретация. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. 35 с.
- Ломтадзе В. Д.* Инженерная геология. Инженерная петрология. Л.: Недра, 1984. 511 с.
- Озера Карелии.* Справочник / под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Trask P. D.* Origin and environment of source sediment of petroleum. Houston, 1932. 281 p.

GRAIN-SIZE ANALYSIS OF BOTTOM SEDIMENTS IN LAKE TOROSJARVI

N. Myasnikova

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

A comprehensive study of sediment cores from waterbodies is one of the ways to explore paleoclimatic and paleogeographic variability, which is a prerequisite for understanding modern climate change and assessing it adequately. This paper presents the results of a brief lithostratigraphic description and the particle size distribution of bottom sediments of Lake Torosjarvi (Medvezhyegorsky District, Republic of Karelia). Sediment fraction sizes in the study area varied from very fine sand to silty clay. The prevalent fraction was coarse silt. A preliminary analysis of changes in sedimentation in Lake Torosjarvi suggests there occurred five shifts in the dynamic water regimes in the course of the lake formation.

МОРФОГЕНЕТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ВОДОЕМОВ БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

М. С. Потахин

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

Проведена классификация водоемов водосбора Онежского озера на основании данных по 256 озерам, расположенным в границах Республики Карелия. Для разделения озер на типы использована схема геоморфологического районирования. Выделено четыре типа водоемов, рассчитаны средние значения морфометрических характеристик и их изменения. В дальнейшем планируется расширить выборку и получить зависимости расчета неизвестных величин по известным показателям (например, зависимости расчета объема воды и глубин от площади).

Онежское озеро – второй по величине пресный водоем Европы с площадью водной поверхности около 10 тыс. км² и водосборного бассейна более 53 тыс. км². В пределах его водосбора находится свыше 9,5 тыс. озер, озерность бассейна изменяется от 18 % (на севере) до 1 % (на юге) [Онежское озеро, 2010]. Водоемы различаются по многочисленным лимнологическим показателям, в том числе происхождению и размерным характеристикам. Их морфогенетические особенности во многом определяются геологическим строением и историей территории.

Водосбор Онежского озера располагается на границе двух крупных геологических структур – Фенноскандинавского (Балтийского) кристаллического щита и Русской осадочной плиты. На протяжении плейстоценовых оледенений котловина озера и прилегающие территории неоднократно были вмещалищем ледниковых потоков, а в межледниковые периоды – морских и пресноводных водоемов. Во время последнего (валдайского) оледенения котловина и водосбор озера находились в юго-восточном (краевом) фланге ледника и были заняты Онежским ледовым потоком Беломорского ледового комплекса [Kalm, 2012]. В южной и центральной части водосбора четко прослеживаются краевые гряды морен лужской и невской стадий, а на самом северо-западе – ругозерской стадии (сальпаусселькя I) [Saarnisto, Saarinen, 2001]. Современная гидрографическая сеть водосборного бассейна начала формироваться в позднеледниковье (около 14,5–13,0 тыс. л.н.), во время деградации покровного оледенения, и окончательно оформилась в голоцене [Онежское озеро, 2010]. Согласно возрастно-генетической классификации Д. Д. Квасова [1986], здесь получили развитие озера, возникшие во время плейстоценового оледенения, и озера, возникшие на рубеже позднеледниковья и голоцена.

В настоящее время существует большое количество классификаций водоемов по их генезису [Первухин, 1937; Hutchinson, 1957; Пармузин, 1975; Квасов, 1986 и др.], в том числе региональных классификаций [Молчанов, 1946; Литинский, 1962; Фрейндлинг, Поляков, 1965; Асеев, 1967; Бискэ, Лукашов, 1970 и др.]. В первом приближении все водоемы бассейна Онежского озера по особенностям их генезиса можно разделить на три группы [Молчанов, 1946]: 1) озера, развитые в трещинах и сбросах кристаллических пород; 2) озера, лежащие во впадинах песчано-глинистых ледниковых отложений; 3) озера, расположенные в области развития известняков, перекрытых песчано-глинистыми отложениями. Озера первой группы соотносятся с котловинами тектонического генезиса и распространены в пределах кристаллического щита, второй – ледникового и имеют повсеместное развитие, третьей – карстового происхождения и представлены в пределах осадочной плиты. Однако сложность и неоднозначность генезиса котловин определяет наличие большого количества групп водоемов, а также многочисленных их подгрупп, типов и подтипов.

Так, озера тектонического генезиса, распространенные в пределах водосбора Онежского озера, можно разделить на два основных типа [Бискэ, Лукашов, 1970] – котловины, преимущественно связанные с разрывными тектоническими нарушениями разного порядка, и котловины, связанные со складчатыми структурами при незначительной роли разрывной тектоники. К первому типу относят следующие подтипы: сложные грабены, связанные с зонами глубинных разломов и структурами, расположенными в пределах этих зон; простые грабены, связанные с тектоническими нарушениями, усложняющими внутреннее строение структур; приразломные котловины, расположенные непосредственно в зонах разломов, секущих разновозрастные комплексы. Ко второму типу относятся котловины, приуроченные к синклиналим складкам,

и котловины, приуроченные к антиклинальным складкам. Роль тектонических нарушений в формировании этих котловин незначительна, они располагаются в складках, осложняющих внутреннее строение более крупных структур.

Среди многообразия котловин ледникового генезиса на водосборе Онежского озера широкое распространение получили аккумулятивные котловины [Бискэ, Лукашов, 1970]. К ним относят следующие подтипы: сложные аккумулятивные котловины, сформировавшиеся в пределах значительных по размерам площадей развития ледниковых и водно-ледниковых аккумулятивных форм рельефа; простые аккумулятивные котловины (среди них выделяют отдельно ледниково-просадочные котловины, образовавшиеся в результате таяния погребенного льда и просадки грунта); остаточные котловины, развитые в пределах развития озерно-ледниковых равнин (среди них выделяют реликтовые озера, отделившиеся от Онежского озера в позднеледниковье, и лагунные озера, отделившиеся от него на протяжении голоцена); подпрудные ледниковые котловины (подразделяются на две, резко отличные друг от друга группы: системы озер, подпруженных краевыми образованиями ледника, котловины которых созданы его аккумулятивной деятельностью, и цепочки линейно вытянутых озер в тектонических понижениях, подпруженные и разделенные ледниковыми и водно-ледниковыми формами). К котловинам ледникового происхождения также относятся экзарационные котловины, созданные выпахивающим воздействием покровного оледенения. Собственно экзарационных котловин в бассейне Онежского озера нет, но тектонические котловины, ориентированные по направлению движения ледника, подвергались его воздействию, в результате чего происходило их углубление и расширение и сглаживание берегов.

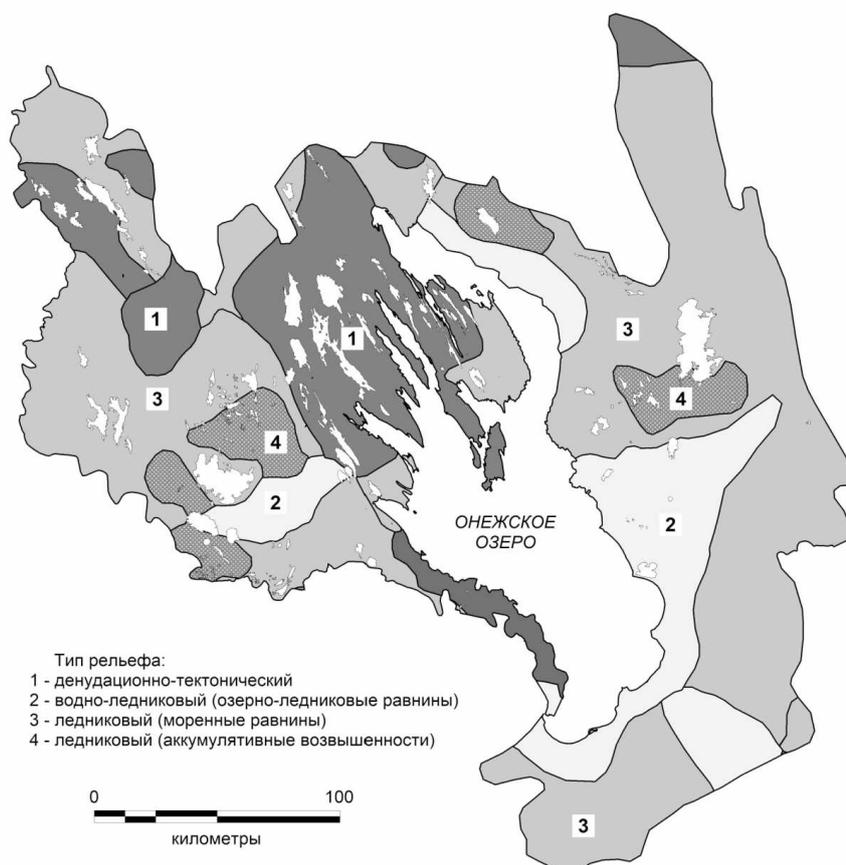
Карстовые котловины получили распространение в южной части водосбора Онежского озера (район Балтийско-Каспийского водораздела) в связи с развитием здесь карстующихся пород (известняков). Среди основных генетических типов карстовых котловин, по механизму их образования, выделяют коррозийные, провальные и тектонико-карстовые котловины [Максимович, 1969].

Отнесение водоемов к тому или иному типу (а тем более подтипу, группе или подгруппе) требует детальных исследований: геологических, геоморфологических, палеолимнологических и др. Зачастую в связи с нехваткой средств и времени сделать это затруднительно. Поэтому, основываясь на характерной для территории Карелии связи озерных котловин с рельефом [Литинская, 1976], для разработки морфогенетической классификации озер нами были использованы морфометрические характеристики водоемов и геоморфологические особенности территории. Подобный подход был применен, например, для озер Швеции [Håkanson, Karlsson, 1984], расположенных в схожих физико-географических условиях Фенноскандии.

Целью данной работы являлось проведение морфогенетической классификации водоемов водосбора Онежского озера. Для этого была обобщена информация о морфометрических характеристиках озер, расположенных в пределах его водосборного бассейна (256 водоемов в границах Республики Карелия). Использовались как кадастровые данные (235 озер) [Ресурсы..., 1965, 1972], так и материалы собственных полевых исследований (21 озеро) [Потахин, 2011, 2013, 2017 и др.]. В качестве основы районирования была выбрана геоморфологическая схема Карелии, представленная в работе И. Н. Демидова [2003]. Согласно схеме, в пределах водосбора Онежского озера выделены следующие крупные генетические типы рельефа (рис.): денудационно-тектонический, водно-ледниковый (озерно-ледниковые равнины) и ледниковый (моренные равнины и межлопастные аккумулятивные возвышенности). Было выполнено разделение озер исходя из вмещающего типа рельефа и произведен расчет средних значений морфометрических характеристик и их изменений для каждого типа водоемов (табл.).

Тип I – озера в пределах развития денудационно-тектонического рельефа. Их характеризуют большие размеры (см. табл.), вытянутая форма (коэффициент удлиненности 10), большие глубины и конусообразная форма котловин (коэффициент формы 0,35). Можно выделить два высотных уровня распространения этих водоемов: 35–75 м и 115–178 м. Среди них преобладают озера тектонического генезиса: простые грабены, приразломные котловины, а также котловины, приуроченные к синклиналим и антиклинальным складкам.

Тип II – озера в пределах развития водно-ледникового рельефа (в пределах Водлинской и Шуйской озерно-ледниковых равнин). Данный тип водоемов имеет наименьшее распространение (всего 20 озер). Их отличают более низкое гипсометрическое положение (33–90 м), округлая и овальная форма (коэффициент развития 1,52) и небольшие глубины. Среди них преобладают водоемы ледникового генезиса: остаточные и лагунные озера.



Геоморфологическое районирование водосбора Онежского озера

Тип III – озера в пределах развития ледникового рельефа (в пределах моренных равнин). Их характеризуют более высокое гипсометрическое положение (75–186 м), относительно простая форма и относительно небольшие глубины. Среди них преобладают водоемы ледникового генезиса: сложные и простые аккумулятивные котловины.

Основные морфометрические характеристики различных типов озер

Показатель	Тип I	Тип II	Тип III	Тип IV
Высота над уровнем моря, м	78 (35–178)	55 (33–90)	143 (75–186)	144 (95–203)
Площадь зеркала, км ²	22,2 (0,18–185)	11,6 (0,04–74,0)	13,7 (0,003–322)	1,45 (0,01–44,0)
Длина береговой линии, км	37,0 (2,7–169)	14,8 (1,3–54,2)	18,6 (0,24–232)	5,9 (0,4–39,4)
Длина, км	11,4 (0,93–41,7)	4,5 (0,5–15,6)	4,8 (0,08–36,2)	1,8 (0,1–12,6)
Максимальная ширина, км	2,6 (0,12–7,3)	2,3 (0,20–7,4)	1,8 (0,06–15,9)	0,7 (0,10–4,6)
Коэффициент удлиненности	10,0 (2,5–46,4)	3,6 (1,6–8,6)	5,1 (1,3–15,6)	4,2 (1,0–12,2)
Коэффициент развития	2,55 (1,26–5,90)	1,52 (1,08–2,44)	1,93 (1,06–3,65)	1,81 (1,02–4,22)
Средняя глубина, м	7,6 (1,7–18,0)	2,7 (1,0–5,6)	3,6 (0,7–10,8)	3,7 (0,6–12,4)
Максимальная глубина, м	23,7 (7,0–74,0)	5,5 (1,6–10,7)	9,8 (1,3–31,5)	8,4 (0,9–48,0)
Объем воды, 10 ⁶ м ³	199,5 (1,3–1800)	32,8 (0,04–230)	59,5 (0,01–1780)	8,5 (0,04–545)
Коэффициент формы	0,35 (0,11–0,63)	0,52 (0,16–0,72)	0,46 (0,17–0,78)	0,48 (0,22–0,82)
Количество озер	42	20	75	119

Тип IV – озера в пределах развития ледникового рельефа (в пределах межлопастных аккумулятивных возвышенностей). Этот тип водоемов имеет наибольшее распространение (119 озер). Их отличают более высокое положение (95–203 м), относительно простая форма и относительно небольшие глубины. Отличительная черта водоемов данного типа – малые размеры (см. табл.). Среди них преобладают водоемы ледникового генезиса: простые аккумулятивные и ледниково-просадочные котловины.

В дальнейшем в рамках разработки морфогенетической классификации озер краевой зоны валдайского оледенения планируется пополнить выборку изучаемых водоемов. В первую очередь, за счет включения озер, расположенных в пределах административных границ Ленинградской, Вологодской и Архангельской областей. Увеличение выборки и ее математико-статистический анализ позволит получить зависимости расчета неизвестных величин по известным показателям. Например, зависимости расчета объема воды и глубин от площади для водоемов каждого типа.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 19-05-50014.

Список литературы

- Асеев А. А.* Генетическая классификация ледниковых озер равнин // История озер Северо-Запада. Л., 1967. С. 249–257.
- Бискэ Г. С., Лукашов А. Д.* Генетическая классификация озерных котловин Карелии // История озер: труды Всесоюзного симпозиума. Т. II. Вильнюс, 1970. С. 258–274.
- Демидов И. Н.* Четвертичные отложения // Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 19–27.
- Квасов Д. Д.* Возрастно-генетическая классификация котловин озер Северной и Центральной Евразии // Известия ВГО. 1986. Т. 118, № 6. С. 487–492.
- Литинская К. Д.* Режим уровней воды озер и водохранилищ Карелии. Л.: Наука, 1976. 146 с.
- Литинский Ю. Б.* Генетические типы озерных котловин Карельского региона // Биология внутренних водоемов Прибалтики. М.; Л., 1962. С. 29–36.
- Максимович Г. А.* Основы карстоведения. Т. II. Вопросы гидрогеологии карста, реки и озера карстовых районов, карст мела, гидротермокарст. Пермь, 1969. 530 с.
- Молчанов И. В.* Онежское озеро. Л.: Гидрометеиздат, 1946. 208 с.
- Онежское озеро.* Атлас. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.
- Пармузин Ю. П.* Генетическая классификация озерных котловин // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск, 1975. С. 406–414.
- Первухин М. А.* О генетической классификации озерных ванн // Землеведение. 1937. Т. 39, № 6. С. 526–537.
- Потахин М. С.* Морфологические особенности водоемов города Петрозаводска // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Материалы IV Школы-конференции молодых ученых с международным участием. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 180–183.
- Потахин М. С.* Морфологические особенности озер ледораздельных аккумулятивных возвышенностей // География: инновации в науке и образовании: Материалы Междунар. конф. LXVI Герценовские чтения. СПб., 2013. С. 193–196.
- Потахин М. С.* Новые данные по морфологии озер Заонежского полуострова // Общество. Среда. Развитие. 2017. № 3(44). С. 91–98.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад.* Л.: Гидрометеиздат, 1965. 700 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 3. Гидрографические описания рек и озер.* Л.: Гидрометеиздат, 1972. 956 с.
- Фрейндлинг В. А., Поляков Ю. К.* Морфология и гидрология озер Заонежья // Вопросы гидрологии, озераведения и водного хозяйства Карелии. Петрозаводск, 1965. Вып. XXIII. С. 63–78.
- Hutchinson G. E.* A treatise on limnology. V. 1. Geography, Physics and Chemistry. N. Y., 1957. 1015 p.
- Håkanson L., Karlsson B.* On the relationship between regional geomorphology and lake morphometry – a Swedish example // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. 1984. Vol. 66(1–2). P. 103–119.
- Kalm V.* Ice-flow pattern and extent of the last Scandinavian Ice Sheet southeast of the Baltic Sea // Quaternary Science Reviews. 2012. Vol. 44. P. 51–59.
- Saarnisto M., Saarinen T.* Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the lake Onega basin to the Salpausselkä End-Moraine // Global and Planetary Change. 2001. Vol. 31. P. 387–405.

A MORPHOGENETIC CLASSIFICATION OF WATERBODIES IN THE LAKE ONEGO CATCHMENT AREA (REPUBLIC OF KARELIA)

M. Potakhin

Northern Water Problem Institute, Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk

The classification of lakes in the Onego lake catchment is based on data for 256 lakes within the boundaries of the Republic of Karelia. The geomorphological zonation scheme was used to group the lakes into four types. The average values of morphometric characteristics and their variation were calculated for each type. It is planned to find the relationships for calculating unknown values from known indices (for example, the dependence of the water volume and depth on the area).

ВОЗМОЖНОСТИ И ЗАДАЧИ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ПРИ ЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

П. А. Рязанцев

Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

В работе рассматриваются вопросы изучения донных отложений методом георадиолокации и показаны результаты исследований малого ледникового озера Полевское. Демонстрируется возможность определения георадаром морфологии дна, а также поиска котловин и бугров. С использованием бурения оценивается точность определения глубины залегания литологических границ георадаром. На радарограммах выявлены области нарушения условий седиментации, которые обусловлены гидродинамическими процессами, что подтверждается исследованиями гранулометрического состава образцов.

Вопросы изучения донных осадков в озерах, расположенных на территориях, покрытых ледником в эпоху плейстоцена – голоцена, имеют большое значение для выполнения реконструкций процессов дегляциации и связанных с ними климатических изменений [Krinner et al., 2004], в том числе палеопаводков и наводнений [Schillereff et al., 2014]. Весьма актуально проведение подобных исследований на территории севера Евразии, где донные осадки множества малых водоемов обеспечивают сбор широкого спектра палеолимнологических данных [Demidov et al., 2006; Lyså et al., 2011]. В свете чего представляет интерес поиск признаков изменения режима осадконакопления с использованием методов геофизики, позволяющих выполнить пространственное описание седиментационных границ.

Одним из наиболее эффективных методов для решения задач лимнологии является георадиолокация. Этот метод используется для работы на акваториях достаточно давно [Haeni et al., 1987], обеспечивая сбор большого количества данных о морфологии котловин водоемов и мощности донных осадков [Moortman, 2002]. Подобные исследования выполняются для изучения условий седиментации и положения уровней осадконакопления [Buynevich, Fitzgerald, 2003], определения морфологии дна озер [Yao et al., 2012], оценки скорости накопления и объема донных осадков [Lachhab et al., 2015], выделения разломов и смещений ложа водоема [Rodionov et al., 2018]. В представленной работе демонстрируются возможности георадиолокации для изучения донных осадков на примере малого ледникового озера.

Метод георадиолокации основан на генерации прибором – георадаром, сверхширокополосных электромагнитных импульсов наносекундного диапазона и приеме сигналов, отраженных от неоднородностей изучаемой среды [Владов, Судакова, 2017]. Принципы его работы во многом схожи с классическим способом изучения донных осадков – сейсмоакустическим профилированием. В геологическую среду передается импульс (в данном случае электромагнитная волна), а через определенный промежуток времени регистрируются его отражения. Принимаемый сигнал несет в себе информацию

об электрофизических неоднородностях среды и записывается в виде трассы, которая имеет ряд параметров: время прихода, амплитуду, фазу. Набор трасс формирует радарограмму, где экстремумы одних и тех же фаз соединены между собой условными линиями – осями синфазности. Как правило, наличие осей синфазности свидетельствует о формировании рефлекторов из-за изменения физических параметров среды. Это позволяет выделять отдельные слои, которые можно сопоставлять с литологическим строением зондируемой толщи. Кроме осей синфазности в качестве поисковых признаков выступают участки записи с определенными параметрами волнового поля, так называемые георадарные комплексы и фации [Владов, Судакова, 2017]. Таким образом, объект поиска на радарограмме может иметь комплексные характеристики – наличие осей синфазности определенной формы, амплитуду отраженного сигнала и его затухание и т. д. Совокупность таких признаков формирует так называемый поисковый образ (паттерн), который служит инструментом интерпретации. Б. Мурман в своей обобщающей работе выделил восемь основных паттернов для озерных обстановок [Moogman, 2002].

Изначально на радарограмме по горизонтальной оси указывается положение зондирующих трасс, а по вертикальной – времена прихода импульсов. Переход от временной разверстки к глубинному разрезу выполняется путем присвоения диэлектрической проницаемости (ϵ) выделенным слоям. Это позволяет получить скорость распространения волны и, зная время, рассчитать глубину залегания границ. Значения ϵ для донных осадков приводятся в табл. 1. Следует отметить, что величина ϵ является комплексной и зависит от ряда различных факторов.

Таблица 1. Георадарные характеристики донных осадков

Тип осадков	по: [Moogman, 2002]		Текущее исследование	
	ϵ	V (м·нс ⁻¹)	ϵ	V (м·нс ⁻¹)
Вода	80	0,033	81	0,033
Гиттия	50	0,042	63–70	0,035–0,037
Алеврит	5–30	0,070	38	0,048
Глина	5–40	0,060	40	0,047
Песок	20–30	0,060	–	–

В рамках представленной работы изучено строение донных осадков оз. Полевского (N62°18'46.4"; E35°16'46.3"), которое расположено в центре Заонежского полуострова на высотной отметке 54,7 м, в Медвежьегорском районе Республики Карелия. Предшествующее литостратиграфическое описание донных осадков оз. Полевского показывает наличие толщи гиттии до 6,5 м, которая подстилается далее по разрезу песчаным алевритом и ленточными глинами [Гурбич и др., 2017]. Ленточные глины рассматриваемого озера детально изучались методом варвахронологии [Hang et al., 2019]. Следует отметить, что озера на территории Фенноскандинавского щита являются благоприятными объектами для изучения методом георадиолокации вследствие низких значений проводимости воды [Rodionov, Ryazantsev, 2018].

На первом этапе полевых работ в пределах оз. Полевского было выполнено 13 георадиолокационных профилей, которые равномерной сетью покрывают обследуемую площадь. Съемка выполнялась георадаром ОКО-2 (Логис-Геотех, Россия) с антенным блоком 150М (центральная частота 150МГц) со льда, шаг регистрируемых трасс 5 см, временная разверстка 400 нс. С учетом электрофизических параметров озера полезный сигнал наблюдается на временах до 300 нс, а эффективная глубина исследований составляет порядка 5–6 м. Дистанция на профиле определялась датчиком перемещения, а положение на плане – GPS навигатором. Далее, с учетом радарограмм было пробурено 15 скважин глубиной 2–8 м. Пример получаемых данных приводится на рис. 1. Наиболее отчетливо выделяются две отражающие границы, сформированные на разделах вода – гиттия и гиттия – глина, которые характеризуются интенсивными осями синфазности. Также наблюдается изменчивость морфологии дна озера, в восточной части обнаружены котловина и согласованный с ней бугор. Достоверность полученных результатов подтверждает сопоставление глубинных отметок по данным георадара и по данным бурения скважин (рис. 2). В рассматриваемом случае средняя погрешность для границы вода – гиттия составила $\pm 0,12$ м, а для границы гиттия – глина $\pm 0,36$ м. Полученная точность определения глубин наблюдается и в других исследованиях батиметрии озер методом георадиолокации, что позволяет рассматривать ее как нормальную для подобных исследований [Sambuelli et al., 2015]. Следует отметить, что на практике погрешность определения мощности органических отложений, как правило, больше, чем для водной толщи [Haeni et al., 1987].

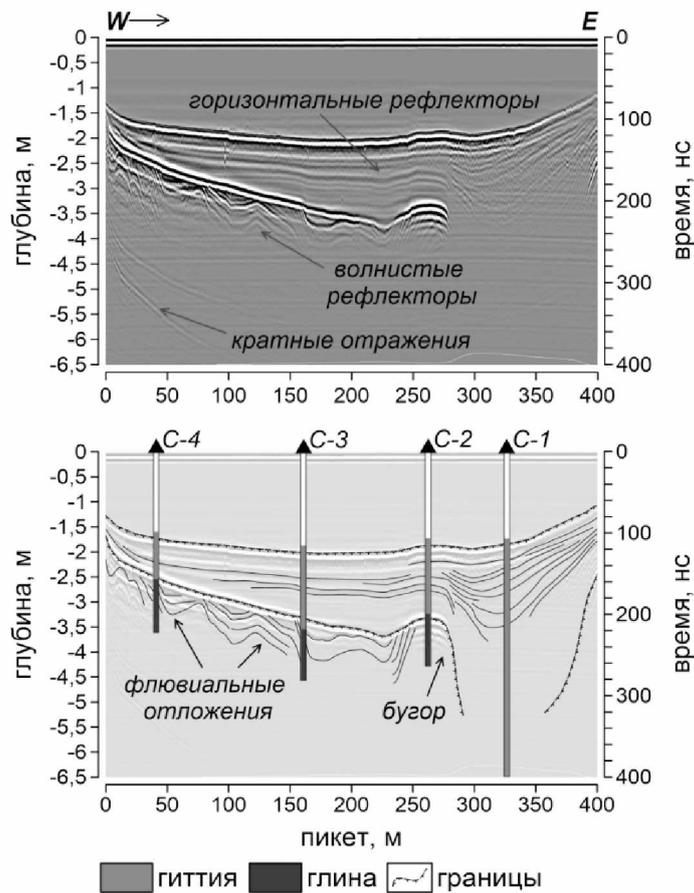


Рис. 1. Радарограмма, полученная в северной части оз. Полевского, и ее интерпретация

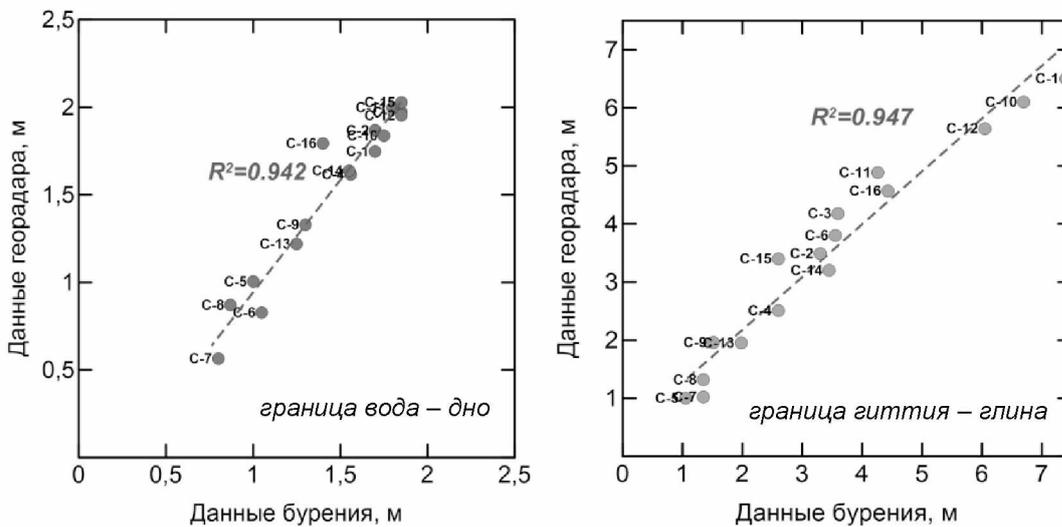


Рис. 2. Сопоставление глубинных отметок по данным георадара и бурения

Кроме вышеуказанных границ на радарограммах в толще глин установлено наличие специфических волнистых рефлекторов. В нормальных условиях электромагнитная волна в глинах полностью затухает и не несет полезного сигнала, так что это свидетельствует об изменении состава и структуры осадков. Опираясь на выделенные предшествующими исследованиями паттерны [Moortman, 2002], сделали предположение, что области волнистых рефлекторов приурочены к флювиальным отложениям. По литературным источникам известно, что анализ радарных фаций не позволяет напрямую определить отдельные слои, в лучшем случае есть возможность выявить некоторые горизонты, вызванные сменой режима осадконакопления, такие, как турбидиды [Arcsone, 2017].

Для подтверждения гипотезы о разности осадков разбурены условно нормальные области радарограммы, то есть с затуханием (см. рис. 1, пикет 250–300), и аномальные, с дополнительным комплексом отражений (см. рис. 1, пикет 50–200). Установлено, что в первом случае имеется четкий эрозионный контакт гиттии и подстилающих глин. Во втором случае обнаружены области переслаивания относительно мелкого и крупного материала (циклиты) мощностью 30–50 см, а также участки перемешивания гиттии и глин с нарушением горизонтальной слоистости. В табл. 2 приводится осредненный гранулометрический состав выделенных классов донных осадков, полученный с использованием лазерного дифрактометра LS 13320 (Beckman Coulter, USA). По гранулометрическому составу видно, что аномальные области имеют более песчаный состав. Этот факт может объяснять формирование дополнительных отражений в волновом поле георадиолокации.

Таблица 2. Гранулометрический состав выделенных классов

Класс осадков	Песок, %	Алеврит, %	Глина, %
Ленточные глины	3,3	71,7	25,0
Область переслаивания			
Слой мелкого состава	5,3	73,8	20,9
Слой крупного состава	44,1	45,6	10,3
Зона взмучивания	63,7	34,6	1,7

Выполненные работы показали эффективность исследований донных осадков водоемов с привлечением метода георадиолокации. Кроме контроля заложения буровых скважин, получены новые данные, отражающие пространственное строение и литологический состав изучаемой осадочной толщи. Совместный анализ результатов георадиолокации и бурения показал достоверность сделанных выводов о стратиграфии донных отложений. Дополнительно на радарограммах по изменению форм седиментационных поверхностей определено положение участков эрозии, а также областей вторичной аккумуляции осадочного материала. Для озерных отложений плейстоцена формирование подобных обстановок может быть вызвано водными потоками, связанными с процессами дегляциации в голоцене.

Работа выполнена при поддержке научного проекта РФФИ № 19-05-00481.

Список литературы

- Владов М. Л., Судакова М. С.* Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений: учебное пособие. М.: «ГЕОС», 2017. 240 с.
- Гурбич В. А., Потахин М. С., Субетто Д. А.* Стратиграфия донных отложений реликтовых водоемов Онежского озера (на примере оз. Полевское) // Астраханский вестник экологического образования. 2017. № 3. С. 4–13.
- Arcone S. A.* Sedimentary architecture beneath lakes subjected to storms: Control by turbidity current bypass and turbidite armouring, interpreted from ground-penetrating radar images // *Sedimentology*. 2017. Vol. 65, N 5. P. 1413–1446. doi. 10.1111/sed.12429.
- Buynovich I. V., Fitzgerald D. M.* High-resolution subsurface (GPR) imaging and sedimentology of coastal ponds, Maine, U.S.A.: implications for Holocene back-barrier evolution // *Journal of Sedimentary Research*. 2003. Vol. 73, N 4. P. 559–571. doi. 10.1306/121802730559.
- Demidov I., Houmark-Nielsen M., Kjær K., Larsen E.* The last Scandinavian Ice Sheet in northwestern Russia: ice flow patterns and decay dynamics // *Boreas*. 2006. Vol. 35. P. 425–443. doi. 10.1080/03009480600781883.
- Haeni F. P., McKeegan D. K., Capron D. R.* Ground penetrating radar study of the thickness and extent of sediments beneath Silver Lake. Water-Resources Investigations Report Connecticut: U. S. Geological Survey, 1987. P. 1–19.
- Hang T., Gurbich V., Subetto D., Potakhin M., Belkina N., Zobkov M., Strakhovenko V.* A local clay-varve chronology of Onega ice lake, NW Russia // *Quaternary International*. 2019. Vol. 524. P. 13–23. doi. 10.1016/j.quaint.2019.03.021.
- Krinner G., Mangerud J., Jakobsson M., Crucifix M., Ritz C., Svendsen J.-I.* Enhanced ice sheet growth in Eurasia owing to adjacent ice-dammed lakes // *Nature*. 2004. Vol. 427. P. 429–432. doi. 10.1038/nature02233.
- Lachhab A., Booterbaugh A., Beren M.* Bathymetry and Sediment Accumulation of Walker Lake, PA Using Two GPR Antennas in a New Integrated Method // *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. 2015. Vol. 20. P. 245–255. doi. 10.2113/JEEG20.3.245.
- Lyså A., Jensen M. A., Larsen E., Fredin O., Demidov I. N.* Ice-distal landscape and sediment signatures evidencing damming and drainage of large pro-glacial lakes, northwest Russia // *Boreas*. 2011. Vol. 40. P. 481–497. doi. 10.1111/j.1502-3885.2010.00197.x.

Moorman B. J. Ground-Penetrating Radar Applications in Paleolimnology. In Book: Developments in Paleoenvironmental Research / Ed. Smol J. P. Dordrecht: Springer, 2002. Vol. 1. P. 23–47. doi. 10.1007/0-306-47669-X_3.

Rodionov A. I., Nikolaeva S. B., Ryazantsev P. A. Evaluation of GPR capabilities in the study of seismogenic faulting and deformation in the bottom sediments of Lake Upoloksha (northeast of the Fennoscandian shield) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. Vol. 9, N 4. P. 1189–1203. doi. 10.5800/GT-2018-9-4-0390.

Rodionov A. I., Ryazantsev P. A. GPR study of sapropel deposits in Karelian shallow water areas // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil, 2018. P. 1–4. doi. 10.1109/ICGPR.2018.8441637.

Sambuelli L., Colombo N., Giardino M., Godone D. A waterborne GPR survey to estimate fine sediments volume and find optimum core location in a rockglacier lake // *Near Surface Geoscience*. 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Turin, 2015. P. 1–5. doi. 10.3997/2214-4609.201413826.

Schillereff D. N., Chiverrell R. C., Macdonald N., Hooke J. M. Flood stratigraphies in lake sediments: A review // *Earth-Science Reviews*. 2014. Vol. 135. P. 17–37. doi. 10.1016/j.earscirev.2014.03.011.

Yao X., Liu S., Sun M., Junfeng W., Guo W. Volume calculation and analysis of the changes in moraine-dammed lakes in the north Himalaya: A case study of Longbasaba lake // *Journal of Glaciology*. 2012. Vol. 58. P. 753–760. doi. 10.3189/2012JoG11J048.

POSSIBILITIES AND TASKS FOR GROUND PENETRATING RADAR APPLICATION IN LYMNOLOGICAL STUDIES

P. Ryazantsev

Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

The paper discusses the aspect of studying bottom sediments by ground penetrating radar (GPR) and shows the results of studies of the small glacial Lake Polevskoye. The possibility of determining the bottom morphology by GPR and the search for hollows and hillocks is demonstrated. The accuracy of determining the bedding depth of lithological boundaries by GPR is estimated using coring. GPR profiles revealed areas of disrupted sedimentation caused by hydrodynamic processes, as confirmed by studies of the particle size distribution of the samples.

ЭКОГЕОХИМИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МАЛЫХ ОЗЕР ФОНОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РФ В РЕСПУБЛИКЕ КАРЕЛИЯ И МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

З. И. Служковский^{1,2}, М. А. Медведев², В. А. Григорьев³, А. С. Мицуков¹

¹ *Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты*

² *Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

³ *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Приводятся данные о химическом составе современных донных отложений малых озер условно-фоновых территорий Республики Карелия и Мурманской области. На основе анализа главных элементов и оценки количества органического вещества дается классификация изученных озерных осадков. Характер поведения тяжелых металлов, включая Pb, Sb, Cd, Ni и Cu, в колонках исследованных отложений позволяет реконструировать основные этапы техногенного влияния на окружающую среду района. Установлено, что скорость седиментации, рассчитанная по активности изотопа ²¹⁰Pb в верхних слоях донных отложениях озер, составляет 0,6 мм/год. Основными источниками исторической антропогенной нагрузки на водоемы и их водосборы выступают промышленные выбросы от предприятий разных стран Европы и Мурманской области.

На территории Республики Карелия и Мурманской области насчитывается около 160 тысяч озер, большинство из которых относятся к категории малых водоемов. Изучение этих объектов – важная научная задача, имеющая к тому же большую практическую значимость. С 2014 г. три северных района Карелии и вся территория Мурманской области отнесены к Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ), что усилило интерес к исследованию состояния окружающей среды указанных регионов или их отдельных частей.

Донные отложения (ДО) малых озер давно зарекомендовали себя как очень удобные объекты для изучения воздействия антропогенной деятельности, как на сами водные объекты, так и на территории, которые их окружают [Даувальтер, 2012]. Существующие методы анализа вещества ДО озер, включая прецизионную геохимию с использованием масс-спектрометрии, позволяют довольно подробно реконструировать техногенные события последних двух-трех веков при исследовании стратифицированных колонок озерных осадков. Наибольший интерес представляют исследования районов, которые можно отнести к фоновым территориям, где на озера и другие природные объекты не оказывается влияние каких-либо прямых антропогенных источников. Большая часть территории АЗРФ как раз относится к фоновой зоне.

Таким образом, цель данной работы заключалась в оценке эколого-геохимического состояния ДО двух малых озер, расположенных в Лоухском районе Республики Карелия и Терском районе Мурманской области, на значительном удалении от местных источников загрязнения.

Полевые работы были проведены летом 2019 г. Для исследования были выбраны два малых водоема: оз. № 1 и оз. Малое Лендозеро (рис. 1). На каждом из озер были проведены съемка дна при помощи эхолота-картплоттера Garmin Echomap Plus 42sv, оценка прозрачности и отбор проб воды и ДО. Вода отбиралась с поверхностного слоя (1 м) при помощи батометра. Отложения отбирались в районах максимальных глубин озер при помощи дночерпателя Экмана-Берджи и гравитационного пробоотборника Limnos. Дночерпательные пробы использовались для оценки содержания органического вещества и главных элементов в ДО исследуемых озер, а пробы взяты гравитационным отборником – для исследования уровня накопления тяжелых металлов (ТМ). В итоге в оз. № 1 на глубине 6 м была отобрана колонка ДО мощностью 33 см, в оз. Малое Лендозеро на глубине 15 м – колонка ДО мощностью 39 см. Обе колонки были разделены на слои по 1 см.

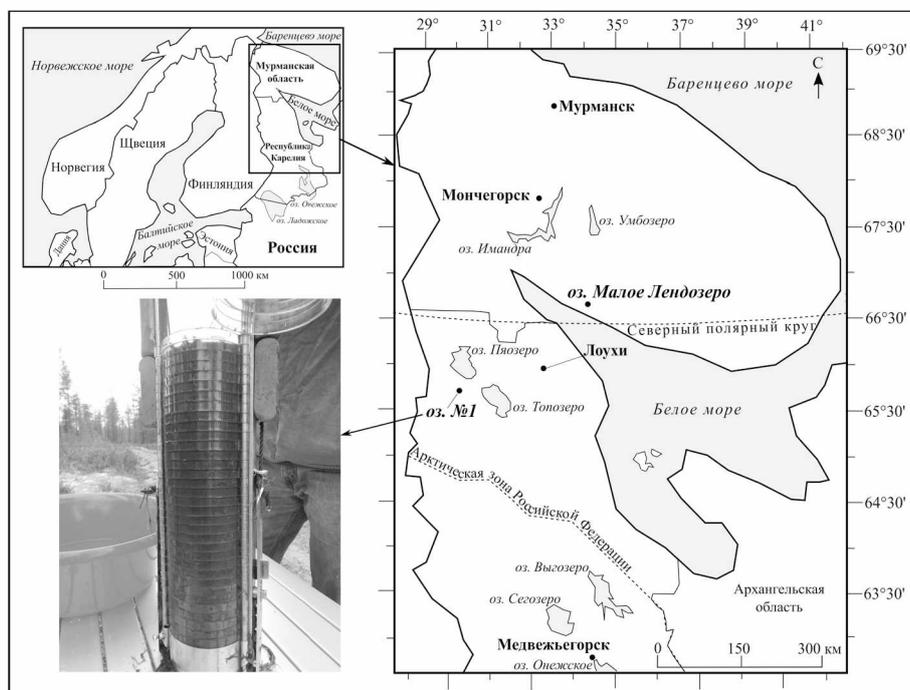


Рис. 1. Карта района исследования и фото колонки ДО оз. № 1 (Лоухский район РК)

Определение потерь при прокаливании (ППП) проводилось весовым способом после нагревания исследуемых проб до температуры 550 °С. Содержание главных элементов (оксидов Si, Fe, Al, Ca и др.) в ДО озер было выполнено при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра

ARL ADVANT'X. Оценка концентраций ТМ (Pb, Cd, Sb, Ni, Cu, Zn, Sn) в пробах ДО определялась масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS. Время накопления ДО в оз. Малое Лендозеро и, соответственно, скорость седиментации в водоеме были рассчитаны по изменению концентрации изотопа ^{210}Pb (метод неравновесного ^{210}Pb). Концентрации ^{210}Pb были установлены по альфа-активности его внучатого изотопа – находящегося с ним в радиоактивном равновесии ^{210}Po . Альфа-спектрометрические измерения аналитических препаратов ^{210}Po были произведены на спектрометре ORTEC Alpha-Duo с ион-имплантированным кремниевым детектором.

Анализ химического состава воды озер № 1 и Малое Лендозеро показал, что воды оз. № 1 относятся к хлоридному классу натриевой группы (тип I), а воды оз. Малое Лендозеро – к гидрокарбонатному классу кальциевой группы (тип III). Минерализация воды обоих озер составила всего около 10 мг/л (ультрапресные воды), что ниже, чем средний показатель по Республике Карелия (25 мг/л) [Озера..., 2013].

Результаты анализа содержания органического вещества (по ППП) и главных элементов в ДО изученных озер показали, что эти осадки близки по химическому составу к диатомитам, которые как раз распространены на севере Карелии [Демидов, Шелехова, 2006] и, возможно, на юге Мурманской области. Так, и в осадках обоих озер содержание органики – 38 %, а содержание SiO_2 составляет 55 % (оз. № 1) и 58 % (оз. Малое Лендозеро). На долю остальных главных элементов приходится не более 7 % от всей массы вещества ДО озер. Согласно данным по среднему содержанию химических элементов в континентальной земной коре [Wedepohl, 1995], отложения изученных озер АЗРФ обеднены всеми главными элементами. Это типичная ситуация для большинства озер Севера России, так как на территории Карелии и Мурманской области горные породы имеют крайне слабую растворимость по сравнению с более южными регионами.

Расчет возраста и скорости осадконакопления в озерах (на примере оз. Малое Лендозеро) по активности изотопа ^{210}Pb показал, что верхние слои ДО водоема (0–9 см) накопились примерно за 190 лет и что средняя скорость седиментации составила 0,6 мм/год. Данное значение вполне укладывается в диапазон скоростей осадконакопления (от 0,3 до 1,25 мм/год), который получен для малых озер Мурманской области и северной Фенноскандии [Даувальтер, Кашулин, 2019]. С другой стороны, в более южных районах Карелии скорость седиментации может быть существенно выше, что связано с большим количеством органического вещества, поступающего в водоемы или образующегося внутри него [Слуковский и др., 2017; Slukovskii et al., 2020].

Корреляция данных о возрасте отложений оз. Малое Лендозеро с данными по накоплению ТМ в отдельных слоях осадков показала, что заметно повышенный уровень накопления Pb, Sb, Cd и других металлов приходится на период с начала XVIII века до настоящего времени (рис. 2). Это совпадает

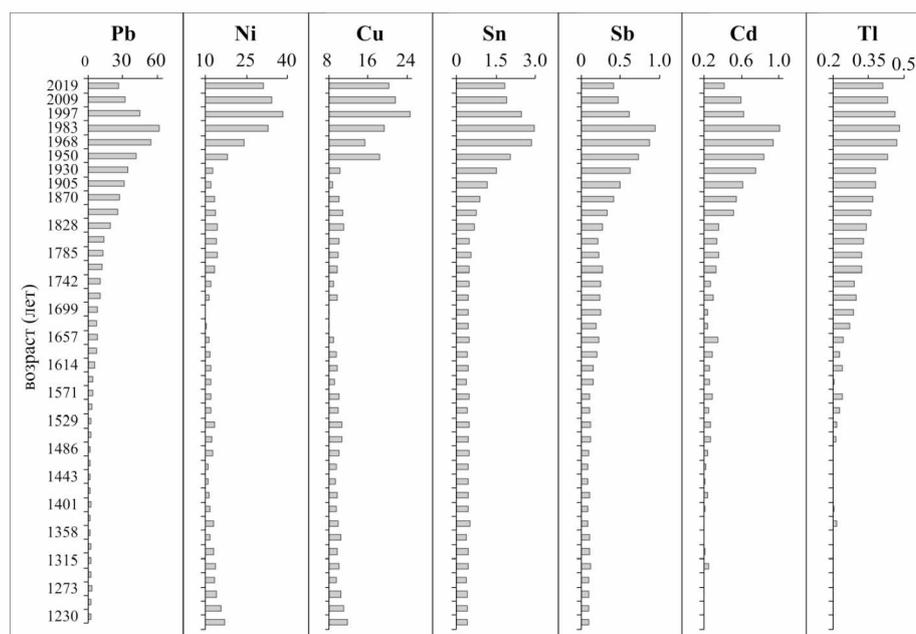


Рис. 2. Вертикальное распределение концентраций ТМ в колонке ДО с учетом возраста озерных осадков

с представлениями о начале и развитии индустриальной эпохи в странах Западной Европы и выбросами промышленных предприятий, сжигающих ископаемое топливо [McConnell, Edwards, 2008]. Во многих публикациях к агентам дальнего переноса загрязнителей относят Pb, Sb, Cd, Tl и Sn. Считается, что в виде микрочастиц эти металлы могут переноситься на расстояния от сотен до первых тысяч километров от источника загрязнения, поэтому многие фоновые территории АЗРФ не могут в полной мере считаться таковыми из-за этого процесса. Кроме того, отмечается большая роль автотранспорта в загрязнении удаленных районов Pb, который использовался в качестве добавки к бензину с 1920-х до начала 2000-х гг. по всему миру [Escobar et al., 2013].

Повышение уровня накопления Ni и Cu в слоях колонки ДО оз. Малое Лендозеро, вероятно, имеет прямое отношение к выбросам медно-никелевого комбината (г. Мончегорск, Мурманская область), расположенного в 150 км от исследованного озера [Даувальтер и др., 2010]. Предприятие начало работу в конце 1930-х гг., и повышение уровня Ni и Cu приходится как раз на период с 1930 по 2019 г. В работах по современному атмосферному переносу ТМ из Мурманской области в более южные районы отмечается, что влияние металлургических заводов региона регистрируется на расстоянии, как минимум, до 400 км [Виноградова, Иванова, 2013].

Следует отметить, что все показанные закономерности поведения ТМ в ДО оз. Малое Лендозеро установлены и в колонке ДО оз. № 1, включая повышенный уровень накопления Ni и Cu. Для всех изученных металлов, кроме Tl, выявлена тесная корреляция между концентрациями элементов в одних и тех же слоях ДО (рис. 3). Это говорит о том, что скорости седиментации в двух изученных озерах, несмотря на большое расстояние между ними, практически совпадают. Следовательно, динамика накопления Pb, Cd, Sb, Sn в оз. № 1 Лоухского района Карелии также связана с дальним переносом от предприятий Европы, а поведение Ni и Cu – с выбросами медно-никелевого металлургического комбината в г. Мончегорске (рис. 1).

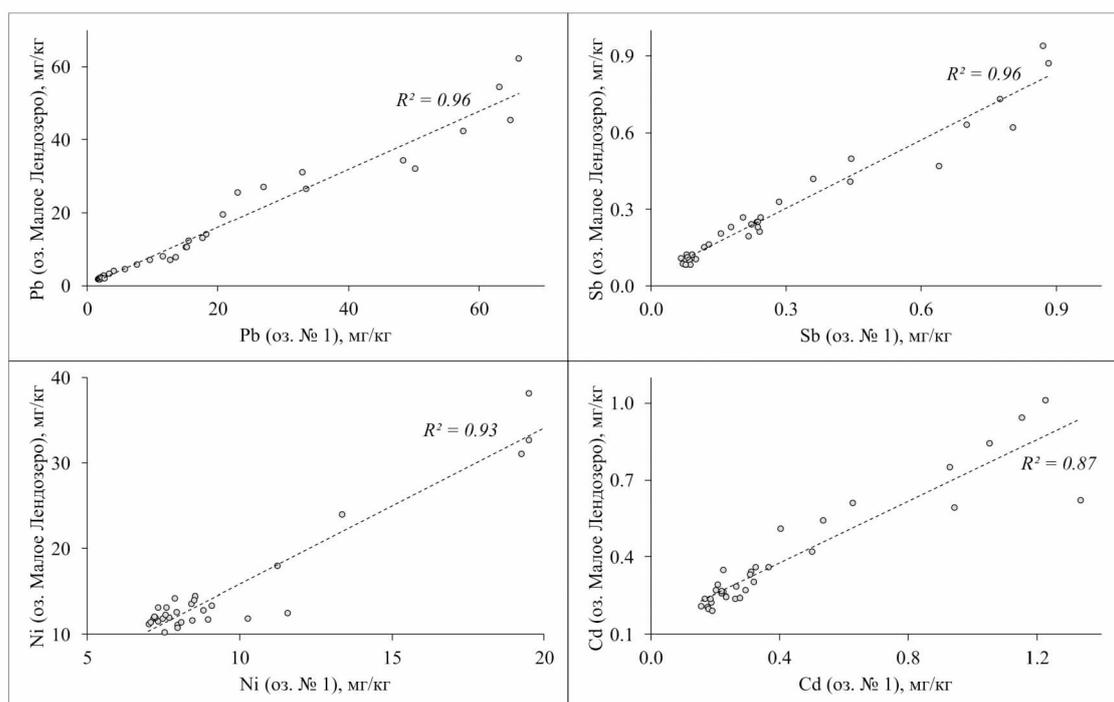


Рис. 3. Взаимосвязь концентраций Pb, Sb, Ni и Cd в колонках изученных озер

Самые нижние слои исследованных отложений оз. Малое Лендозеро и оз. № 1 (глубина от 20 см и ниже) можно отнести к фоновым, сформированным в доиндустриальное время. Полученные фоновые медианные концентрации Pb, Sb, Cd, Sn, Ni и Cu для обоих водоемов оказались ниже, чем фоновые значения этих металлов для ДО малых озер южной части Карелии [Slukovskii, 2020]. Только концентрации Tl в фоновых слоях исследованных малых озер АЗРФ несколько выше, чем аналогичные фоновые значения для водоемов юга республики. Это может быть связано с тем, что отложения озер Малое Лендозеро и № 1 – это диатомит, а в исследованных малых озерах юга Карелии осадки представлены органическими или органо-силикатными

сапропелями, в которых больше органического вещества, являющегося хорошим сорбентом различных химических элементов. Однако этот вывод нужно будет подтверждать дальнейшими исследованиями содержания металлов в озерных диатомитах Карелии. С другой стороны, исследования показали, что в современных слоях ДО металлы, относящиеся к агентам дальнего переноса, накапливаются по одним и тем же закономерностям несмотря на литологические особенности озерных осадков.

Работа выполнена в рамках научного проекта гранта Президента РФ № МК-462.2019.5 и при поддержке научного проекта РФФИ № 18-05-00897.

Список литературы

- Виноградова А. А., Иванова Ю. А.* Загрязнение воздушной среды в центральной Карелии при дальнем переносе антропогенных примесей в атмосфере // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2013. № 5. С. 98–108.
- Даувальтер В. А.* Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А.* Фоновые содержания элементов в донных отложениях озера Имандра // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. № 7. С. 13–30.
- Даувальтер В. А., Даувальтер М. В., Кашулин Н. А., Сандимиров С. С.* Химический состав донных отложений озер в зоне влияния атмосферных выбросов комбината "Североникель" // Геохимия. 2010. № 11. С. 1224–1229.
- Демидов И. Н., Шелехова Т. С.* Диатомиты Карелии (особенности формирования, распространения, перспективы использования). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 89 с.
- Озера Карелии.* Справочник / под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
- Слуковский З. И., Ильмаст Н. В., Суховская И. В., Борвинская Е. В., Гоголев М. А.* Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 45–63.
- Escobar J., Whitmore T. J., Kamenov G. D., Riedinger-Whitmore M. A.* Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA // Journal of Paleolimnology. 2013. Vol. 49(2). P. 237–252.
- McConnell J. R., Edwards R.* Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic // Proceedings of the National academy of sciences. 2008. Vol. 34. P. 12140–12144.
- Slukovskii Z. I.* Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia // Vestnik of MSTU. 2020. N 23(1). P. 80–92.
- Slukovskii Z., Medvedev M., Siroezhko E.* Long-range transport of heavy metals as a factor of the formation of the geochemistry of sediments in the southwest of the Republic of Karelia, Russia // Journal of Elementology. 2020. Vol. 25(1). P. 125–137.
- Wedepohl K. H.* The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59, N 7. P. 1217–1232.

GEOCHEMISTRY OF RECENT SEDIMENTS IN SMALL LAKES IN BACKGROUND AREAS OF THE RUSSIAN ARCTIC ZONE IN THE REPUBLIC OF KARELIA AND MURMANSK REGION

Z. Slukovskii^{1, 2}, M. Medvedev², V. Grigoriev³, A. Mitsukov¹

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre RAS, Apatity

² Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

³ St. Petersburg State University, St. Petersburg

Data on the chemical composition of recent sediments in small lakes in undisturbed areas of the Republic of Karelia and Murmansk Region are presented. Based on the analysis of the main elements and estimation of the amount of organic matter, a classification of the studied lake sediments is given. The behavior of heavy metals, including Pb, Sb, Cd, Ni, and Cu, in the cores of the studied sediments, allows us to reconstruct the main stages of the technogenic impact on the region's environment. It was found that the sedimentation rate calculated from the activity of the ²¹⁰Pb isotope in the upper layers of the lake sediments was 0.6 mm per year. The main sources of past anthropogenic pressure on the water bodies and their catchments are industrial emissions from enterprises from different countries of Europe and the Murmansk Region.

ГИДРОФИЗИКА

УСЛОВИЯ ВЫХОДА МЕЛКОВОДНОГО БОРЕАЛЬНОГО ОЗЕРА ИЗ-ПОДО ЛЬДА И ОСОБЕННОСТИ ВЕСЕННЕГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

*Г. Г. Гавриленко, А. Ю. Тержевик, Г. Э. Здорвеннова, Р. Э. Здорвеннов,
Н. И. Пальшин, Т. В. Ефремова, С. Р. Богданов*

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

На основе совместного анализа метеоданных, натурных измерений температуры водной толщи и характеристик снежно-ледяного покрова небольшого бореального озера показана возможность развития различных сценариев перемешивания водной толщи озера в течение финального этапа весеннего подледного прогрева и на начальном этапе открытой воды в разные по погодным условиям годы.

Период весеннего перемешивания, несмотря на его относительную непродолжительность, является важным этапом в годовом цикле замерзающих водоемов. В ходе подледного этапа весеннего перемешивания повышается температура поверхностных слоев водной толщи, что приводит к развитию конвективного перемешивания [Farmer, 1975]; по мере заглубления конвективного слоя выравнивается содержание растворенного кислорода по водному столбу [Stefanovic, 2002], перераспределяются клетки водорослей и биогенные вещества, что способствует активизации подледного цветения планктона. Температура поверхностного слоя озера во многом определяет характер перемешивания и после взлома льда на начальной стадии периода открытой воды, в частности, продолжительность гомотермии. При отсутствии ветрового воздействия главными факторами, препятствующими перемешиванию, становятся низкая прозрачность водной толщи и повышающаяся температура поверхностного слоя водоема.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на небольшом мелководном озере Вендюрском, расположенном в южной части Карелии [Озера Карелии, 2013]. Для анализа использовались данные натурных измерений температуры воды, полученные в ходе полевых кампаний лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН на этом озере. Начиная с июля 2007 г. до настоящего времени в центральной глубоководной части озера находится коса, оснащенная автономными логгерами температуры RBR Ltd., закрепленными с дискретностью по вертикали 0,2–1,5 м и измеряющими температуру воды с шагом по времени в 1 мин. В анализе также использовались данные ежегодных ледовых съемок, которые проводятся на озере в марте – апреле и включают измерение толщины и описание структуры снежно-ледяного покрова на 22 станциях продольного и поперечного разрезов, и измерения потоков солнечной радиации на поверхности и в подледном слое озера, полученные на станции радиационных измерений в период весенних полевых работ [Zdorovennova et al., 2018]. В рамках данной работы были рассмотрены весенние условия четырех следующих друг за другом лет – с 2015 по 2018 г. Метеорологические данные для МС Петрозаводск получены на сайте «Reliable Prognosis» https://rp5.ru/Weather_in_the_world. Анализ температуры воздуха по МС Петрозаводск проводился относительно среднемноголетней

нормы периода 1961–1990 гг., данные получены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД) [Булыгина и др., 2014].

Результаты и их обсуждение

Весенние условия четырех исследованных лет заметно отличались по погоде и состоянию льда, что отразилось на температуре водной толщи озера и характерных сроках годового цикла водоема.

Среднемесячная весенняя температура воздуха по МС Петрозаводск изучаемых лет отличалась заметной вариабельностью относительно периода осреднения 1961–1990 гг. Так, в 2015 и 2016 гг. все три весенних месяца были теплее климатической нормы, причем в 2015 г. средние температуры марта, апреля и мая превышали показатель базисного периода (БП) на 5,1, 0,7 и 2,0 °С, а в 2016 г. – на 3,2, 2,0 и 4,3 °С, соответственно (рис. 1). В 2017 г. температура воздуха в марте превышала климатическую норму на 3,4 °С, но последующие два месяца были заметно холоднее нормы: апрель – на 1,3 °С, май – на 3,4 °С. В 2018 г. наиболее холодным был март – ниже нормы на 3,8 °С, зато апрель и май были теплее нормы на 1,6 и 4,1 °С, соответственно.

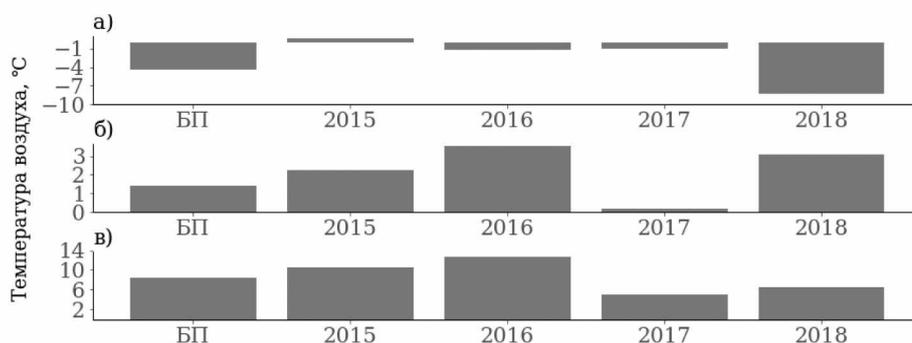


Рис. 1. Среднемесячная температура воздуха марта (а), апреля (б) и мая (в) исследуемых лет и базисного периода (БП) (1961–1990 гг.) по МС Петрозаводск

Ледовый режим водоема также заметно отличался в исследуемые годы. Даты установления и взлома льда в разные годы, а также толщина и структура снежно-ледяного покрова озера в феврале 2017 г. и апреле 2015–2018 гг. приведены в табл. 1. Наиболее длительный ледостав наблюдался в зимний сезон 2016–2017 гг. – более 194 суток. За период непрерывных наблюдений на оз. Вендюрском, начиная с 1994 г., это самый длительный период существования льда [Zdorovenov et al., 2013; Здорovenнова и др., 2017]. Дата взлома льда весной 2017 г. – 18 мая – близка к наиболее позднему окончанию ледостава – 19 мая 1995 г. Наиболее короткий ледостав – 159 суток – наблюдался в зимний сезон 2014–2015 гг. Весной 2015 г. озеро освободилось ото льда 30 апреля, эта дата близка к наиболее раннему взлому льда – 29 апреля 2000 г. [Zdorovenov et al., 2013]. Весной 2016 г. озеро также освободилось ото льда достаточно рано – 4 мая.

Таблица 1. Ледовый режим оз. Вендюрского в 2015–2018 гг. Даты установления и взлома льда, а также толщина снега, белого льда (БЛ), кристаллического льда (КЛ) и общая толщина льда (ОЛ) в феврале 2017 г. и в апреле 2015–2018 гг.

Зимний сезон	Даты установления и взлома льда	Период измерений	Снег, см	БЛ, см	КЛ, см	ОЛ, см
2014–2015	22.11.2014–30.04.2015	9–16.04.2015	0–1	10–24	22–23	37–47
2015–2016	16–27.11.2015, 12.12.2015–4.05.2016	9–13.04.2016	0–1	2–6	41–47	44–51
2016–2017	5.11.2016–18.05.2017	22.02.2017	25–30	–	–	45–47
		1.04.2017	2–11	24–38	20–35	56–63
		7–11.04.2017	0–3	27	27–32	54–59
2017–2018	23.11.2017–8.05.2018	22.04.2018	1–3	16–31	16–30	41–47

Наибольшая толщина льда в середине апреля наблюдалась весной 2017 г. – около 60 см, в другие годы толщина льда составляла 40–50 см. Ледовый покров озера в конце зимы включал слои белого и кристаллического льда. При этом толщина белого льда была обычно меньше,

чем толщина кристаллического. В середине зимы толщина снега на льду озера достигала 25–30 см, в то время как в апреле редко превышала 10 см.

Оптические свойства снежно-ледяного покрова также заметно отличались в период проведения полевых работ в исследуемые годы. Наибольшим было альbedo заснеженной поверхности озера в апреле 2017 г. (максимальное значение 0,9, среднее за период измерений – 0,7). При измерениях в апреле 2015, 2016 и 2018 гг. поверхность озера была практически свободна от снега, поэтому ее альbedo было заметно ниже: максимальные значения достигали 0,56, 0,43, и 0,45, а средние – 0,33, 0,26 и 0,38, соответственно. Дневные максимумы потока солнечной радиации на нижней границе льда в период измерений в 2015 и 2016 гг. достигали 130 и 180 Вт/м², соответственно. В 2017 г. заснеженная поверхность льда препятствовала проникновению солнечной радиации в подледный слой, потоки которой составляли единицы Вт/м². В период измерений 18 апреля 2018 г. поток солнечной радиации на нижней границе льда достигал 50 Вт/м².

Погодные условия и ледовый режим озера, заметно отличающиеся в годы исследований, определили различия в продолжительности и интенсивности весеннего подледного прогрева и конвективного перемешивания (табл. 2).

Таблица 2. Весенняя подледная конвекция в 2015–2018 гг.

Зимний сезон	Начало конвекции	Конвекция, сут.	Глубина КПС, м	Температура КПС, °С
2014–2015	15.03.2015	47	7	3,2
2015–2016	28.03.2016	38	10	4,1
2016–2017	20.04.2017	28	8	4
2017–2018	14.04.2018	24	7	3

Наиболее раннее начало конвекции и наибольшая ее продолжительность наблюдались весной 2015 и 2016 гг. В 2015 г. подледная конвекция отличалась заметной продолжительностью, но развивалась достаточно вяло. Период 15 марта – 1 мая 2015 г. характеризовался облачной погодой (среднее значение облачности 0,7), что являлось ограничивающим фактором поступления солнечной радиации и усиления конвекции. Наиболее интенсивной была конвекция весной 2016 г., когда перемешивание охватило практически всю водную толщу озера, температура КПС превысила 4 °С, а в подледном слое температура превышала 5,5 °С. Такое распределение температуры в конце зимы является нетипичным для оз. Вендюрского; обычно глубина проникновения конвективного перемешивания составляет 6–8 м, температура КПС редко превышает 4 °С [Zdorovenov et al., 2013]. Повышение температуры воды в подледном слое более 4 °С регистрировалось также весной 1999 г., когда была достигнута температура 5,7 °С [Kirillin, Terzhevik, 2011]. Весной 2017 и 2018 гг. период подледного прогрева продолжался менее месяца, что близко к среднемноголетнему значению этого показателя [Zdorovenov et al., 2013; Здоровеннова и др., 2017].

После освобождения ото льда состояние водной толщи озера определялось текущими погодными условиями и заметно отличалось в исследованные годы. В течение первой недели открытой воды 1–7 мая 2015 г. в придонных слоях глубоководной котловины озера сохранялся тонкий стратифицированный слой толщиной около одного метра, полное перемешивание водной толщи произошло 7 мая при усилении ветра до 4–5 м/с. Температура водной толщи составила при этом 4 °С. Далее в течение мая температура водной толщи, которая находилась в состоянии слабо выраженной стратификации, периодически сменяющейся гомотермией, постепенно повышалась и достигла к 25 мая 10,5 °С (рис. 2).

Нетипичное распределение температуры, наблюдавшееся в конце ледостава 2016 г., а также теплая маловетренная погода (температура воздуха в дневные часы поднималась до 17–22 °С, скорость ветра не превышала 3–4 м/с) привели к тому, что водная толща озера не была перемешана после взлома льда (см. рис. 2). Слабая стратификация, сформировавшаяся подо льдом, усилилась после освобождения ото льда и существовала в течение месяца, таким образом, период полного весеннего перемешивания после взлома льда в этом году был утерян. Подробнее этот феномен рассмотрен в работе [Терзевик и др., 2017]. Подобное явление – исчезновение весеннего перемешивания – отмечается на лесных озерах и ламбах Финляндии на фоне потепления климата [Arvola et al., 2010].

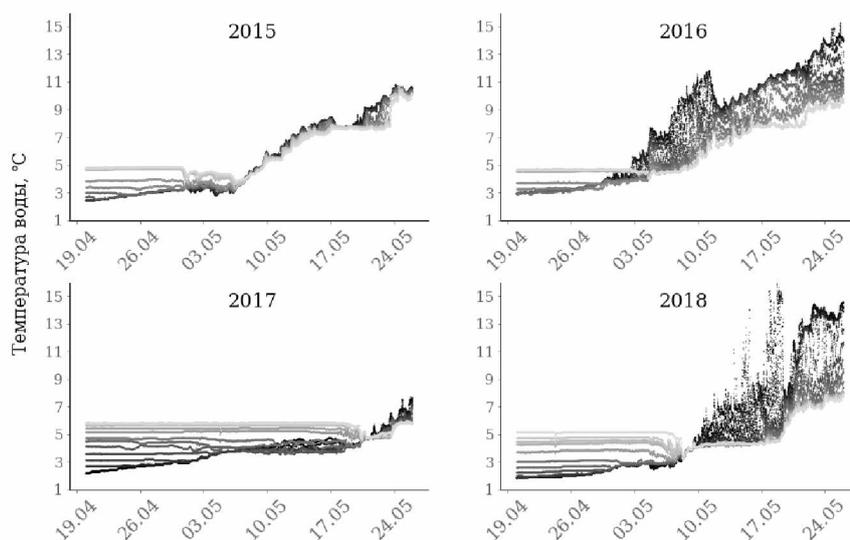


Рис. 2. Температура водной толщи оз. Вендюрского в период 20 апреля – 25 мая в 2015–2018 гг. Интенсивность окраса линий возрастает от придонных горизонтов измерений к поверхностным

Похожая картина наблюдалась в 2017 г., когда после позднего вскрытия озера водная толща находилась в состоянии слабо выраженной стратификации (максимальная разница температур на верхнем и нижнем горизонтах периодически достигала 2,4 °С) и перемешалась полностью через 10 суток после взлома льда. В 2018 г. выраженная стратификация быстро сформировалась после вскрытия озера, 10 мая разница температур на верхнем и придонном горизонтах измерений достигала 2,5–3 °С, таким образом, в перемешанном состоянии водная толща пребывала около суток после взлома. На фоне теплой маловетреной погоды стратификация быстро усиливалась, и через неделю после выхода озера в открытую воду разница температур в приповерхностном и придонном слоях в центральной котловине превышала 8 °С.

Выводы

На фоне изменений климата происходят заметные сдвиги в годовом термическом цикле водоемов, которые, в свою очередь, влияют на функционирование водных экосистем. Ранний старт и большая продолжительность весенней подледной конвекции наблюдались на оз. Вендюрском в годы с высокой относительно климатической нормы температурой воздуха марта. В зависимости от комбинации погодных и снежно-ледовых условий (во многом определяемых, в свою очередь, погодными условиями конца зимы) на финальном этапе ледостава меняется интенсивность подледного перемешивания, температура КПС может превысить температуру максимальной плотности и привести к формированию стратификации подо льдом. Период перемешивания после взлома льда в такой ситуации либо заметно сокращается, либо может вообще выпасть из годового термического цикла озера. На примере четырех лет показано, что продолжительность этапа весеннего перемешивания после взлома льда может продолжаться несколько недель, однако в отдельные годы этот этап может полностью исчезать из годового термического цикла. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на определении комбинаций условий, приводящих к подобным последствиям, методами математического моделирования и на оценке рисков для водной экосистемы.

Работа выполнена при поддержке научных проектов РФФИ № 13-05-00338 «Обратные связи между биотическими и абиотическими процессами в озерах. Влияние весенней конвекции и массового развития фитопланктона на прозрачность воды и формирование летней стратификации в мелководном озере», № 14-05-91761 «Цикл углерода в системе озеро – атмосфера: наблюдения и моделирование / Роль физических процессов в динамике метана в мелководных бореальных озерах» и № 16-05-00436_а «Теплообмен в мелководном озере, покрытом льдом: Процессы и механизмы».

Список литературы

Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В. «Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. 2014.

Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen J., Терзевик А. Ю. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия РГО. 2017. Т. 149, вып. 6. С. 59–74.

Озера Карелии. Справочник / под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Терзевик А. Ю., Голосов С. Д., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Волков С. Ю., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Богданов С. Р. Возможное влияние «необычной» весны на режим растворенного кислорода в мелководном озере в летний период // Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2017. № 10. С. 17–27. doi: 10.17076/lim712.

Arvola L., George G., Livingstone D. M. et al. The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes, in *The Impact of Climate Change on European Lakes* // Aquatic Ecology, Series 4, edited by D. G. George. P. 85–101. Springer Verlag, 2010.

Farmer D. H. Penetrative convection in the absence of mean shear // *Quart J Roy Meteorol Soc.* 1975.101:869–891.

Kirillin G., Terzhevik A. Thermal instability in freshwater lakes under ice: Effect of salt gradients or solar radiation? // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2011. 65:184–190.

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenнова G. et al. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // *Est. Journal of Earth Sciences.* 2013. Vol. 61, N 1. P. 26–32.

Stefanovic D. L., Stefan H. G. Two-dimensional temperature and dissolved oxygen dynamics in the littoral region of an ice-covered lake // *Cold Regions Science and Technology.* 2002. Vol. 34. N 3. P. 159–178. doi: 10.1016/S0165-232X(02)00003-4.

Zdorovenнова G., Palshin N., Efremova T., Zdorovennov R., Gavrilenko G., Volkov S., Bogdanov S., Terzhevik A. Albedo of a Small Ice-Covered Boreal Lake: Daily, Meso-Scale and Interannual Variability on the Background of Regional Climate // *Geosciences.* 2018. 8(6). 206.

THE ICE-OFF CONDITIONS AND SPRING MIXING PROPERTIES IN A SHALLOW BOREAL LAKE

G. Gavrilenko, A. Terzhevik, G. Zdorovenнова, R. Zdorovennov, N. Palshin, T. Efremova,
S. Bogdanov

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk

Based on joint analysis of meteorological data and field measurements of the water temperature and the snow and ice cover properties of a small boreal lake, we investigate the feasibility of various mixing scenarios developing during the final stage of under-ice warming and after ice-off depending on the weather conditions in the year.

ТЕРМИЧЕСКИЙ И ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМЫ АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕР НА ФОНЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА

Р. Э. Здоровеннов¹, Г. Э. Здоровеннова¹, А. В. Гузева^{2, 3}, С. Ю. Евграфова², А. А. Шадрина³,
С. Д. Голосов², И. С. Зверев², И. В. Федорова³

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

² Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Исследование термического и ледового режимов было проведено на трех озерах дельты реки Лены (остров Самойловский). Проанализирована климатическая изменчивость температуры воздуха по данным арктических метеостанций за период 1991–2017 гг. По многолетним данным измерений температуры в озерах определена продолжительность основных этапов их годового термического цикла. Численное моделирование теплового и ледового режимов озер

проводилось с использованием одномерной параметризованной модели FLake (<http://www.flake.igb-berlin.de/>). Сравнение натуральных и модельных данных показало хорошее соответствие. Численные расчеты по данным ре-анализа ERA-5 (www.ecmwf.int) показали, что средняя толщина льда и продолжительность ледового периода на озерах острова Самойловский уменьшались на 3 мм в год и на 0,5 суток за год в период 1979–2018 гг.

Изучение полярных регионов является в настоящий момент одним из приоритетных научных направлений. Устьевые области рек, прибрежные водоемы, озера, болота, затопляемые территории являются наиболее уязвимыми природными объектами Арктики, подверженными влиянию как климатических, так и антропогенных факторов. На сегодняшний день очевидны изменения климата. Как отмечено в Специальном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC): «Полярные регионы теряют лед, и их океаны быстро изменяются. Последствия этих изменений в полярных регионах распространяются на всю планету и воздействуют на человека разными путями» [IPCC, 2019].

Главные особенности изменения климата Арктики, отмеченные в докладе, а также последствия этих изменений заключаются в следующем: повышается температура воздуха и поверхностного слоя океана в период открытой воды; сокращаются площади морского и припайного льда, исчезает многолетний лед, уменьшается объем льда в наземных ледниках, снежный покров на льду и на суше, сокращается период ледостава на озерах; замерзание арктических морей смещается на более поздние сроки; уменьшается альbedo поверхности океана летом в связи с резким уменьшением площадей, занятых снежным и ледяным покровом; возрастает количество водяного пара в атмосфере Арктики, увеличивается облачность; отступает вечная мерзлота, проваливается грунт, появляются многочисленные новые озера; увеличивается речной сток в моря Северного Ледовитого океана, происходит изменение среды обитания – потеря уникального биоразнообразия высокоарктических видов, расширение ареала субарктических видов и т. д.

Перечисленные факторы оказывают влияние на термические процессы в арктических озерах и в целом на функционирование их экосистем. На фоне повышения температуры воздуха изменяется продолжительность основных этапов годового термического цикла озер, главным образом, за счет сокращения периода ледостава [Arp et al., 2013; Leppäranta, 2015; O'Reilly et al., 2015]. Увеличиваются период открытой воды и период испарения, что может приводить к уменьшению глубины водоемов. Увеличивается накопление тепла донными отложениями. В небольших озерах на фоне активизации цветения водорослей может уменьшаться прозрачность воды, что может приводить к большему радиационному нагреву поверхностных слоев озер и обострению стратификации [Shatwell et al., 2016]. Изменяющийся режим перемешивания в период открытой воды [MacIntyre et al., 2009] может способствовать ухудшению кислородных условий. Эти и другие происходящие в арктических озерах изменения могут привести к необратимым последствиям для их экосистем [Alaska..., 2015].

Цель исследования – изучение термического и ледового режимов арктических озер на фоне изменчивости регионального климата.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на озерах о. Самойловский, расположенного в дельте р. Лены. Дельта р. Лены играет огромную гидрологическую и экологическую роль в естественном функционировании крупного речного бассейна и прибрежной системы моря Лаптевых, оказывая влияние на климат и ледовые процессы.

Длительные измерения температуры проводились с использованием термокос, установленных в центральных глубоководных частях озер Моло, Рыба и Баня-2. На косах использовались температурные логгеры Нобо и RBR Ltd. Информация о проведенных измерениях и характеристике озер приведены в табл. 1.

Численное моделирование теплового и ледового режимов этих озер проводилось с использованием одномерной параметризованной модели FLake (<http://www.flake.igb-berlin.de/>). Модельный расчет был выполнен с учетом вечной мерзлоты. При расчетах для всех озер задавались следующие модельные установки: глубина тепло активного слоя донных отложений – 3 м, температура

на его нижней границе $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент экстинкции водной толщи переменный – в зависимости от температуры воды (T_w) и биомассы водорослей (Bio): $\gamma = 1,74/L$, где L – прозрачность, $L = F(T_w, Bio)$. Численные расчеты по данным реанализа ERA-5 (www.ecmwf.int) были проведены для периода 1979–2018 гг.

Таблица 1. Характеристики озер о. Самойловский и информация о проведенных измерениях

Озеро	$H_{ср}$, м	Диск Секки, м	Период измерений	Интервал измерений	Горизонты измерений, м
Моло	2,2	1,5	10.07.2009–18.08.2012	1 ч	0, 2, 4
Рыба	3,1	2,0	4.07.2009–7.08.2012	1 ч	0, 2, 4
			20.04–23.08.2019	5 мин	2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5
Баня-2	4,3	2,5	6.07.2009–18.08.2012	1 ч	0, 2, 4, 6

Примечание. Расстояние датчика от дна, м.

Изменчивость регионального климата за период 1991–2017 гг. была проанализирована по данным среднемесячных температур воздуха 19 метеостанций арктической зоны: им. Э. Т. Кренкеля, Остров Визе, им. Г. А. Ушакова (Голомянный), Баренцбург, им. Е. К. Федорова (ОГМС), Стерлегова, им. М. В. Попова, Остров Диксон, Малые Кармакулы, Хатанга, им. Е. К. Федорова, Саскылах, Тикси, Чокурдах, Остров Врангеля, Териберка, Мурманск, Святой Нос, Канин Нос. Период 1961–1990 гг. рассматривался как климатическая норма. Для каждого месяца и каждого года периода 1991–2017 гг. было вычислено отклонение от климатической нормы. Данные были получены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Булыгина и др., 2014].

Результаты и их обсуждение

Изменчивость климата Арктики. Анализ данных показал, что начиная с 2005 г. среднегодовая температура воздуха была выше климатической нормы 1961–1990 гг. на всех изученных станциях. Кроме того, выяснилось, что на общем фоне повышения температуры ее изменчивость заметно отличается в разных районах Арктики. Все изученные станции мы условно разбили на четыре группы. Наибольшее положительное отклонение от нормы было обнаружено на трех островных высокоширотных станциях (им. Э. Т. Кренкеля, Остров Визе, им. Г. А. Ушакова). Станции, расположенные на наибольшем удалении от океана (Хатанга, Саскылах, Тикси, Чокурдах), характеризуются меньшим повышением температуры, чем станции, расположенные ближе к береговой линии океана и на островах (Баренцбург, им. Е. К. Федорова (ОГМС), Стерлегова, им. М. В. Попова, Остров Диксон, Малые Кармакулы, Остров Врангеля). Наименьшие отклонения от нормы характерны для станций в западном секторе российской Арктики (Мурманск, Святой Нос, Канин Нос, Териберка).

Максимальные отклонения температуры от нормы по станциям всех четырех групп фиксируются в зимние месяцы, в летние – отклонения заметно меньше. На трех высокоширотных станциях положительные отклонения от нормы в зимние месяцы периода 1991–2017 гг. достигали $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, в летние – не превышали $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. На прибрежных и островных станциях положительные отклонения зимних месяцев были меньше и составляли $3\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а летом достигали $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (июль). Близкие к нулю и отрицательные отклонения температуры февраля характерны для расположенных дальше от океана станций (включая Тикси). Положительные отклонения зимних месяцев на этих станциях не превышали $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, летних – достигали $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наиболее сглаженный годовой ход отклонений температуры воздуха от климатической нормы характерен для станций западного сектора российской Арктики (Мурманск, Святой Нос, Канин Нос, Териберка). Минимальные отклонения от нормы температуры июля на этих станциях – не более $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, в течение года положительное отклонение от нормы составляет $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Очевидно, что выявленные особенности изменчивости температуры воздуха оказывают заметное влияние на термический и ледовый режимы водоемов арктической зоны и определяют различия в их изменении в разных районах Арктики.

Термический и ледовый режимы озер о. Самойловский по данным натурных наблюдений и результатам численного расчета на модели FLake.

По данным термокос были определены даты начала и окончания ледостава, продолжительность весенней подледной конвекции, весенне-летнего нагревания, осеннего охлаждения (табл. 2). Влияние прозрачности и глубины озер на их термический режим изучено в работе [Здоровеннова, Федорова, 2015].

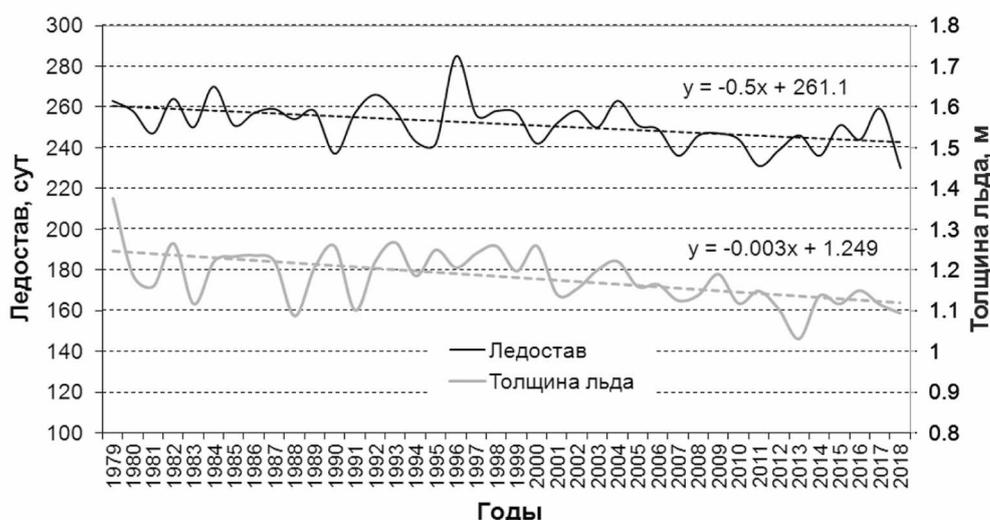
Натурные данные использовались для верификации модели FLake.

Математическое моделирование термического режима выбранных озер, отличающихся по глубине и прозрачности, и сравнение расчетных данных с данными круглогодичных измерений температуры в этих озерах позволили установить, что модель достаточно хорошо воспроизводит годовой ход придонной температуры и изменчивость поверхностной температуры в период открытой воды. Весенний подледный прогрев, обусловленный проникновением солнечной радиации в верхние слои водоемов, моделью не воспроизводится [Федорова и др., 2018], с чем может быть связано более позднее модельное окончание ледостава.

Таблица 2. Основные этапы годового термического цикла озер о. Самойловский по данным многолетних наблюдений: весенняя подледная конвекция (ВПК), окончание ледостава (ОЛ), весенне-летнее нагревание (ВЛН), осеннее охлаждение (ОО), начало ледостава (НЛ)

Озеро	ВПК	ОЛ	ВЛН	ОО	НЛ
Моло				19.07–30.09.2009	1.10.2009
	9.05–15.06.2010	16.06.2010	17.06–19.07.2010	20.07–28.09.2010	29.09.2010
	23.04–16.06.2011	17.06.2011	18.06–21.07.2011	22.07–27.09.2011	27.09.2011
	24.02–15.06.2012	16.06.2012	17.06–26.07.2012		
Рыба				19.07–30.09.2009	1.10.2009
	10.05–16.06.2010	17.06.2010	18.06–19.07.2010	20.07–26.09.2010	27.09.2010
	21.04–14.06.2011	15.06.2011	16.06–20.07.2011	21.07–26.09.2011	27.09.2011
	19.02–11.06.2012	12.06.2012	13.06–26.07.2012		
	22.05–02.06.2019	3.06.2019	4.06–10.07.2019		
Баня-2				19.07–4.10.2009	5.10.2009
	10.05–17.06.2010	18.06.2010	19.06–22.07.2010	23.07–28.09.2010	29.09.2010
	22.04–17.06.2011	18.06.2011	19.06–26.07.2011	27.07–4.10.2011	5.10.2011
	23.02–18.06.2012	19.06.2012	20.06–30.07.2012		

Модельный расчет ледового режима изучаемых озер о. Самойловский с учетом атмосферного воздействия, задаваемого по данным ре-анализа ERA-5 (www.ecmwf.int), показал, что средняя толщина льда и продолжительность ледостава уменьшались на 3 мм в год и на 0,5 суток за год в период 1979–2018 гг. (рис.).



Продолжительность ледостава и максимальная толщина льда на озерах о. Самойловский в период 1979–2018 гг. при задании атмосферного воздействия по данным ре-анализа ERA-5 (www.ecmwf.int)

Работа выполнена при поддержке научных проектов РФФИ № 14-05-00787 «Эмерджентность прибрежных арктических водных экосистем как результат изменения палеоэкологических и современных воздействий» и № 18-05-60291 «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата».

Список литературы

- Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В. «Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. 2014.
- Здоровеннова Г. Э., Федорова И. В. Термический режим малых арктических озер // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12(8). С. 1452–1456.
- Федорова И. В., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э. Термический режим арктических озер на фоне климатической изменчивости // Труды II Всерос. конф. «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». СПб.: ХИМИЗДАТ, 2018. С. 665–668.
- Alaska's Changing Arctic: Ecological Consequences for Tundra, Streams, and Lakes / Edited by J. E. Hobbie, G. W. Kling. Oxford Scholarship, 2015. 352 p.
- Arp C. D., Jones B. M., Grosse G. Recent lake ice-out phenology within and among lake districts of Alaska, USA // Limnol. Oceanogr. Methods. 2013. Vol. 58, N 6. P. 2013–2028.
- IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.). 2019. <https://www.ipcc.ch/srocc/>.
- Leppäranta M. Freezing of lakes and the evolution of their ice cover. Springer. 2015.
- MacIntyre S., Fram J. P., Kushner P. J., Bettez N. D., O'Brien W. J., Hobbie J. E., Kling G. W. Climate-related variations in mixing dynamics in an Alaskan arctic lake // Limnol. Oceanogr. 2009. Vol. 54, N 6, part 2. P. 2401–2417.
- O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42, N 24. P. 10773–10781. doi: 10.1002/2015GL066235.
- Shatwell T., Adrian R., Kirillin G. Planktonic events may cause polymictic-dimictic regime shifts in temperate lakes // Scientific reports. 2016. N 6. P. 24361.

THERMAL AND ICE CONDITIONS OF ARCTIC LAKES IN THE CONTEXT OF REGIONAL CLIMATE VARIABILITY

R. Zdorovenov¹, G. Zdorovennova¹, A. Guzeva^{2,3}, S. Evgrafova², A. Shadrina³, S. Golosov²,
I. Zverev², I. Fyodorova³

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk

² Institute of Limnology RAS, St. Petersburg

³ St. Petersburg State University, St. Petersburg

A study of thermal and ice conditions was carried out at three lakes of the Lena River Delta (Samoilovsky Island). The climatic variability of air temperature is analyzed according to data from arctic weather stations for the period 1991–2017. The duration of the main stages of the lakes' annual thermal cycle was identified using long-term data from temperature measurements. The thermal and ice condition in these lakes were numerically simulated using the one-dimensional parameterized FLake model (<http://www.flake.igb-berlin.de/>). Comparison of field and model data showed good agreement. Numerical calculations based on the ERA-5 reanalysis data (www.ecmwf.int) showed that the average ice thickness and the duration of the ice period on Samoilovsky Island's lakes decreased by 3 mm per year and by 0.5 days per year during the period 1979–2018.

РАСТВОРЕННЫЙ КИСЛОРОД В ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ ОЗЕРАХ: СЕЗОННАЯ И ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Г. Э. Здорвеннова¹, И. В. Федорова², А. А. Шадрина², Г. Г. Гавриленко¹, С. Р. Богданов¹,
Т. В. Ефремова¹, А. Ю. Тержевик¹, Р. Э. Здорвеннов¹, Н. И. Пальшин¹

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Анализ данных длительных полевых измерений температуры, растворенного кислорода, освещенности подо льдом и хлорофилла «а», проведенных на трех покрытых льдом озерах, показал, что зимой на фоне сезонного уменьшения содержания кислорода наблюдается его высокочастотная изменчивость. Колебания содержания кислорода на масштабах времени минуты – дни могут быть обусловлены гидродинамическими процессами и явлениями, такими, как сейши, внутренние волны, адвективный перенос. Весной вовлечение в конвективное перемешивание обедненных кислородом придонных вод приводит к уменьшению концентрации кислорода в конвективном слое, но общее его содержание в столбе воды увеличивается за счет активации фотосинтеза, который отвечает за суточную изменчивость кислорода в поверхностных слоях озер.

Содержание растворенного кислорода, наряду с температурой воды, является определяющим параметром в функционировании озерных экосистем, что наиболее ярко проявляется в период ледостава. Зимой в высокотрофных озерах активное потребление кислорода при бактериальном разложении органического вещества приводит к возникновению придонных анаэробных зон, что оказывает отрицательное воздействие на рыбное сообщество, а также способствует выделению и накоплению парниковых газов (метана, сероводорода) [Bařica, Mathias, 1979; Couture et al., 2015].

До настоящего времени многие аспекты динамики растворенного кислорода в озерах в период ледостава остаются малоисследованными. Установлено, что его сезонная изменчивость в озерах зимой формируется под влиянием ряда гидрофизических и химико-биологических процессов и явлений [Бреховских, 1988; Diaz, 2001]. В условиях отсутствующего газообмена с атмосферой и подавленного фотосинтеза главным источником поступления кислорода в озера может быть речной сток. В малопроточных озерах в течение зимы наблюдается снижение содержания кислорода, обусловленное главным образом затратами на окисление органического вещества [Тержевик и др., 2010]. Динамика растворенного кислорода на масштабах времени от минут до суток исследована крайне слабо. Известно лишь несколько работ, посвященных этой тематике [Baehg, DeGrandpre, 2002; Здорвеннов и др., 2011; Obertegger, Obrador, Flaim, 2017; Пальшин и др., 2019].

В данной работе проанализирована динамика растворенного кислорода в покрытых льдом небольших озерах арктической и субарктической зоны по данным длительных высокочастотных измерений. Цель работы – исследовать динамику растворенного кислорода и влияние на нее различных факторов в покрытом льдом озере в условиях отсутствия газообмена с атмосферой.

Материалы и методы исследований

Исследование базируется на данных полевых измерений температуры и растворенного кислорода, проведенных на трех покрытых льдом озерах: оз. Вендюрском в Карелии (период измерений ноябрь – май 2008–2019 гг., интервал измерений 1 мин), оз. Большой Вудъявр на Кольском полуострове (период измерений 21–24 февраля 2019 г., интервал измерений 1 мин) и оз. Рыба, расположенном на острове Самойловский в дельте р. Лены (период измерений 20 апреля – 3 июня 2019 г., интервал измерений 5 мин).

Для проведения измерений использовались регистраторы температуры и растворенного кислорода RBR Ltd, установленные на косах с дискретностью по вертикали 0,5–2 м. На оз. Вендюрском в период весенней подледной конвекции дополнительно проводились измерения потоков солнечной радиации на нижней границе льда (пиранометр «Theodor Friderich & Co, Meteorologische Gerate und Systeme») и концентраций хлорофилла «а» в водной толще

(мультипараметрический зонд CTD-90M «Sea & Sun Technology» и флюорозонд BBE Moldaenke). Изменчивость температуры и растворенного кислорода в озерах изучалась как в период зимней стагнации, так и в период весенней подледной конвекции.

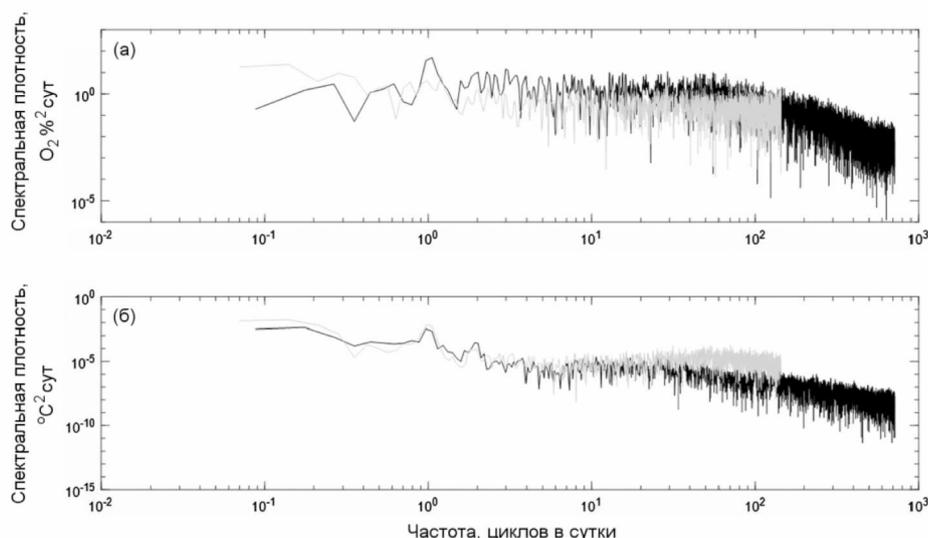
Анализ данных, полученных на оз. Большой Вудъявр, позволил установить, что в течение всего периода измерений 21–24 февраля 2019 г. наблюдались колебания температуры и содержания растворенного кислорода с периодами от 10–40 мин до 4–10 ч. Колебания температуры с периодами 10–40 мин наиболее отчетливо прослеживались в придонном стратифицированном слое озера. Предположительно, эти колебания могли быть обусловлены сейшевой активностью и внутренними волнами. Аналогичные высокочастотные колебания температуры и кислорода в водной толще озер, покрытых льдом, ранее были зафиксированы в разнотипных водоемах [Kirillin et al., 2009; Здоровеннов и др., 2011; Bouffard et al., 2019]. Причинами этих колебаний предположительно могут быть как сейши, так и короткие внутренние волны [Palshin et al., 2018].

Температура воды в оз. Рыба в конце зимы до начала весеннего подледного прогрева в период 20 апреля – 22 мая 2019 г. постепенно понижалась в поверхностных слоях озера (на глубине 2,5 м понизилась с 0,8 до 0,6 °С), при этом в придонном слое практически не изменялась и составляла 2 °С. Содержание растворенного кислорода менялось слабо и в поверхностных слоях озера составляло 6–11 мг/л при насыщении 60–80 %. В придонном слое наблюдалось снижение концентраций до 4–5 мг/л при насыщении 30–40 %.

С началом подледного прогрева 23 мая 2019 г. наблюдался рост температуры воды на всех горизонтах наблюдений, наиболее быстрый в поверхностном слое: за пять суток с 23 по 28 мая температура на глубине 2,5 м увеличилась на один градус – с 0,6 до 1,6 °С. В придонном слое за этот же период температура увеличилась на 0,2 °С – с 2,0 до 2,2 °С. При этом в течение первой недели активного подледного прогрева конвективный перемешанный слой (КПС) не формировался. Четкое выделение перемешанного слоя на вертикальных температурных профилях начинается с 30 мая, когда его нижняя граница прослеживалась на глубине 3,5 м. К 3 июня, когда произошел взлом ледового покрова озера, нижняя граница КПС достигла глубины 5 м, а температура в КПС увеличилась до 2,2 °С.

Таким образом, период весенней подледной конвекции на оз. Рыба в 2019 г. продолжался всего 13 суток, что заметно меньше, чем в другие годы исследований [Здоровеннова, Федорова, 2015]. Весной 2010–2012 гг. на этом озере, как и на других озерах острова Самойловский, период весенней подледной конвекции начинался в середине апреля – первой декаде мая, а ледостав заканчивался в середине июня, то есть конвекция продолжалась более 40–50 суток. В 2010–2012 гг. к концу ледостава температура конвективного слоя в озерах повышалась до 3,5–5,7 °С. Таким образом, весной 2019 г. озеро вышло из-под льда раньше других лет исследований и с низкой относительно температурой водной толщи.

В период весенней подледной конвекции 2019 г. в колебаниях температуры в оз. Рыба четко прослеживалась суточная изменчивость (рис. (б), серая линия). В колебаниях растворенного кислорода выделялись 4–10 ч периодичности (рис. (а), серая линия).



Спектры растворенного кислорода (а) и температуры (б) в озерах Вендюрском (черные линии) и Рыба (серые линии) в период развития весенней подледной конвекции.

По данным, полученным на оз. Вендюрском, было показано, что зимой колебания растворенного кислорода с периодами от минут до нескольких дней (с амплитудой до 0,5 мгО₂/л) могут быть связаны с такими гидродинамическими процессами, как внутренние волны, адвекция, сейши, склоновые течения.

Весной при развитии подледной конвекции в дополнение к этим периодам в конвективном слое озера была отмечена выраженная суточная изменчивость кислорода (амплитуда до 1 мгО₂/л, рис. (а), черная линия). Максимальные значения растворенного кислорода в конвективном слое наблюдались в течение дня, а минимальные – ночью. Кроме того, было зафиксировано увеличение амплитуды суточных колебаний кислорода в конвективном слое на фоне активизации конвекции – при увеличении освещенности подо льдом и росте концентраций хлорофилла «а» в поверхностных слоях озера, что свидетельствует о взаимосвязи между процессами.

Конвективные восходящие и нисходящие потоки и сейши, по-видимому, определяют изменчивость кислорода с периодом от минут до часов. Вовлечение в конвективное перемешивание обедненных кислородом придонных вод приводит к уменьшению концентрации кислорода в конвективном слое, но общее содержание кислорода в толще воды увеличивается на фоне активации фотосинтеза.

Исследование, проведенное на трех покрытых льдом озерах арктической и субарктической зон, позволило изучить динамику растворенного кислорода в период ледостава, включая период весенней подледной конвекции, и выявить факторы, определяющие ее изменчивость. Гидродинамические процессы и явления в покрытых льдом озерах оказывают заметное влияние на высокочастотную изменчивость кислорода в зимний период. Колебания кислорода с периодами от нескольких минут до нескольких часов могут быть обусловлены сейшевой активностью, адвективным переносом и динамикой внутренних волн.

Весной рост подледной облученности и активизация фотосинтеза, наряду с гидродинамическими процессами и явлениями, могут оказывать влияние на вертикальную структуру и временную динамику растворенного кислорода в мелководных озерах. Выделенные колебания кислорода с суточным периодом в поверхностных слоях озер обусловлены предположительно суточным циклом фотосинтеза и деструкцией органического вещества.

Полученные в работе результаты будут способствовать лучшему пониманию изменчивости растворенного кислорода в покрытых льдом озерах, обусловленной суммарным воздействием биологических и гидрофизических факторов.

Работа выполнена при поддержке научных проектов РФФИ № 18-05-60291 Арктика «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата», № 16-05-00436_а «Теплообмен в мелководном озере, покрытом льдом: Процессы и механизмы» и № 14-05-00787_а «Эмерджентность прибрежных арктических водных экосистем как результат изменения палеоэкологических и современных воздействий».

Список литературы

Бреховских В. Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 166 с.

Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Терзевик А. Ю. Изменчивость термического и кислородного режимов мелководного озера зимой // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. № 4. С. 57–63.

Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Терзевик А. Ю., Волков С. Ю., Богданов С. Р. Суточная динамика растворенного кислорода в малом мезотрофном озере в период весеннего подледного прогрева // Известия РГО. 2019. Т. 151, вып. 4. С. 27–39. doi: <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151427-39>.

Терзевик А. Ю. и др. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. 37(5). С. 568–579.

Barica J., Mathias J. A. Oxygen depletion and winterkill risk in small prairie lakes under extended ice cover // J. Fish. Res. Board Can. 1979. N 36. P. 980–986.

Baehr M. M., DeGrandpre M. D. Under-ice CO₂ and O₂ variability in a freshwater lake // Biogeochemistry. 2002. Vol. 61. P. 95–113.

Bouffard D., Zdrovennova G., Bogdanov S., Efremova T., Lavanchy S., Palshin N., Terzhevik A., Love Råman Vinnå, Volkov S., Wüest A., Zdrovennov R., Ulloa H. N. Under-ice convection dynamics in a boreal lake // Inland Waters. 2019. Vol. 9, iss. 2: Life under ice in Lake Onego (Russia) – An Interdisciplinary Winter Limnology Study. P. 142–161. <https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533356>.

- Couture R.-M. et al.* Oxygen dynamics in a boreal lake responds to long-term changes in climate, ice phenology, and DOC inputs // *Geophys. Res. Biogeosci.* 2015. 120. P. 2441–2456. doi: 10.1002/2015JG003065.
- Diaz R. J.* Overview of hypoxia around the World // *Env. Qual.* 2001. Vol. 30. P. 275–281.
- Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T.* Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // *Aquat. Ecol.* 2009. 43(3). P. 641–651.
- Obertegger U., Obrador B., Flaim G.* Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy // *Water Resources Res.* 2017. 53(8). P. 7234–7246. <https://doi.org/10.1002/2017WR020599>.
- Palshin N. I., Bogdanov S. R., Zdorovenнова G. E., Zdorovenнов R. E., Efremova T. V., Belashev B. Z., Terzhevik A. Yu.* Short Internal Waves in a Small Ice-Covered Lake // *Water Resources.* 2018, 45(5). P. 695–705. <https://doi.org/10.1134/S0097807818050159>.

DISSOLVED OXYGEN IN ICE-COVERED LAKES: SEASONAL AND HIGH FREQUENCY VARIATIONS

*G. Zdorovenнова¹, I. Fyodorova², A. Shadrina², G. Gavrilenko¹, S. Bogdanov¹, T. Efremova¹,
A. Terzhevik¹, R. Zdorovenнов¹, N. Palshin¹*

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk

² St. Petersburg State University, St. Petersburg

An analysis of the data from long-term field measurements of temperature, dissolved oxygen, under-ice illumination, and chlorophyll «a», carried out in three ice-covered lakes, showed that in winter, as oxygen content seasonally decreases, it features high-frequency variations. Fluctuations in the oxygen content on minute-day time scales can be caused by hydrodynamic processes and phenomena, such as seiches, internal waves, and advective transport. In spring, the involvement of oxygen-depleted bottom waters in convective mixing leads to a decrease in the oxygen concentration in the convective layer, but its total content in the water column increases due to the activation of photosynthesis, which is responsible for the daily oxygen variability in the surface layers of lakes.

АНАЛИЗ ЦИРКУМПОЛЯРНЫХ ЛЕДОВЫХ КАРТ АНТАРКТИДЫ

Е. Е. Круглова, О. С. Мехова

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Цель настоящей работы – проанализировать особенности сезонного изменения площадей льда Антарктиды с целью определения внутригодовой и межгодовой цикличности по состоянию на 2016 и 2019 гг. Для выполнения работы был проведен визуальный анализ площадей льда с помощью циркумполярных ледовых карт Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) за период с 2015 по 2019 г.

На сайте АНИИ доступны циркумполярные ледовые карты с середины 2015 г. по сегодняшний день [AARI-NIC-NMI...]. Для анализа были выбраны карты за 2016 г., так как в этот период наблюдалась максимальная площадь льда, и 2019 г., когда зафиксировано минимальное значение, что видно на рис. 1 [Спутниковый...].

На рис. 2 (а, б) представлены карты за январь 2016 и 2019 гг., соответственно. Видно, что независимо от года на западном побережье наблюдается большее по площади количество льдов, чем на восточном побережье. Визуальный анализ показывает, что в 2016 г. в море Уэдделла и в море Росса гораздо больше площадь льдов, чем в 2019 г., а в море Лазарева площадь льдов меньше. В 2016 г. льды простираются до 57° ю.ш., в 2019 г. граница льдов достигает 60° ю.ш. Площадь льдов со сплоченностью 8–10 баллов в 2016 г. больше в районе моря Уэдделла, а в 2019 г. – в районе моря Беллинсгаузена. В остальном побережье Антарктиды покрыто льдами одинаково.

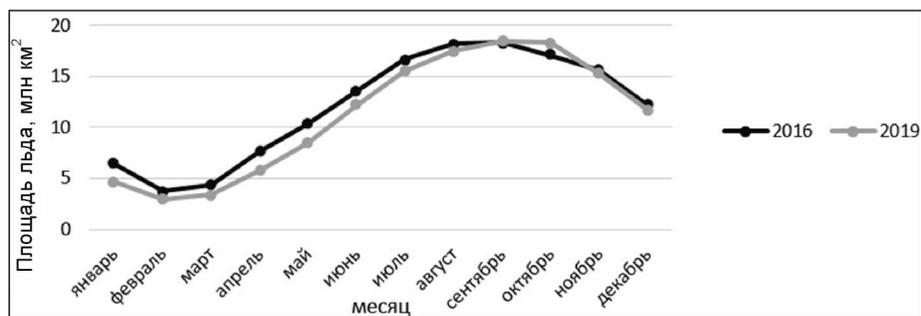


Рис. 1. Площади морского льда в Антарктиде в 2016 и 2019 гг.

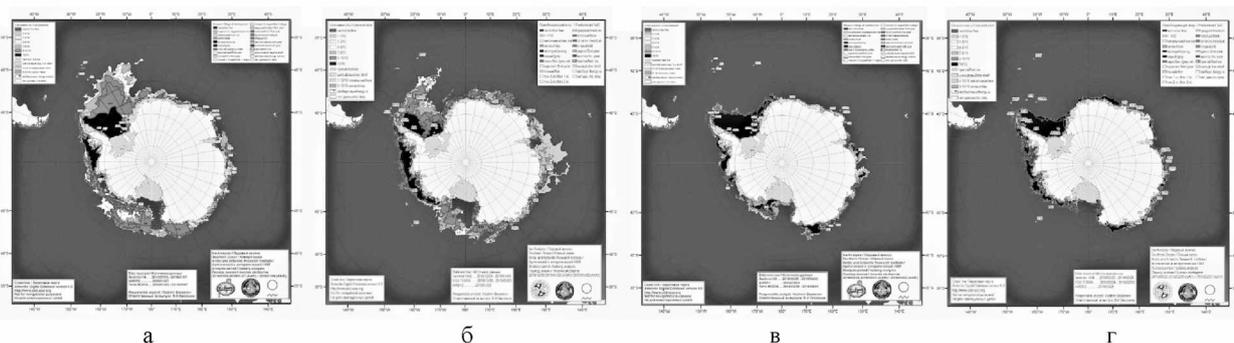


Рис. 2. Площади морского льда в Антарктиде [http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=278]: а) 07.01.2016; б) 03.01.2019; в) 03.03.2016; г) 28.02.2019

На картах следующего рассматриваемого периода (рис. 2, в, г), начало марта 2016 г. и конец февраля 2019 г., наблюдается характерное для этих месяцев резкое уменьшение площадей льда по всему побережью Антарктиды. Граница льдов максимально распространяется до 63° ю.ш., также на картах видно, что вдоль всего западного побережья сплоченность льда достигает 9–10 баллов в оба рассматриваемых года. В 2016 г. в районах моря Уэдделла, моря Росса, моря Дейвиса площадь льдов больше, чем в 2019 г., а в 2019 г. – в районе моря Амундсена и моря Лазарева.

На рис. 3 представлены две карты, которые дают возможность сравнить площадь и сплоченность льда в мае 2016 г. (рис. 3, а) и мае 2019 г. (рис. 3, б). Можно увидеть увеличение площади льдов по всему побережью Антарктиды относительно предыдущего периода. На картах показано, что льды доходят до 60° ю.ш., при этом в 2016 г. льдов больше в районе морей Уэдделла и Беллинсгаузена, а в 2019 г. – в районах морей Лазарева и Амундсена. По остальному побережью количество льдов одинаковое. Почти весь лед имеет сплоченность в 9–10 баллов.

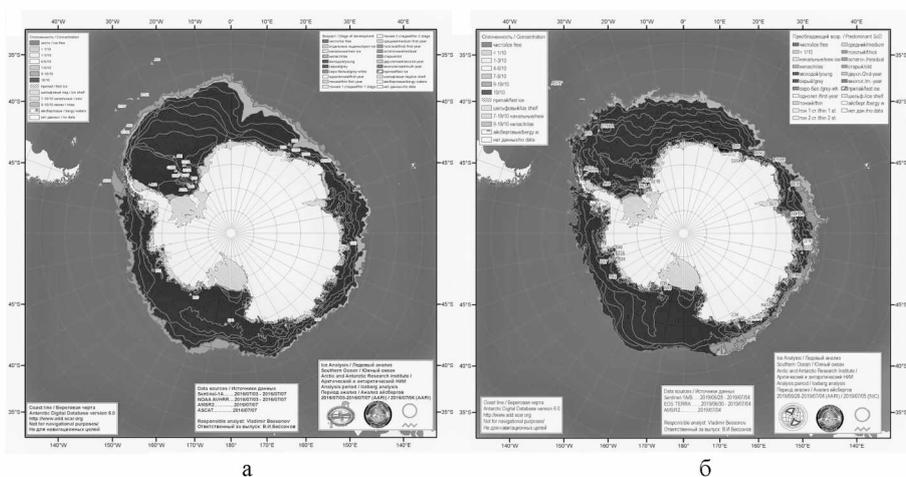


Рис. 3. Площади морского льда в Антарктиде [http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=278]: а) 12.05.2016; б) 09.05.2019

В июле наблюдается дальнейшее увеличение распространения льдов (рис. 4, а, б). В 2016 г. они простираются до 56° ю.ш., а в 2019 г. – до 58° ю.ш. На картах видно, что площадь льда продолжает увеличиваться по всему побережью Антарктиды, независимо от рассматриваемого года, но в 2016 г., в сравнении с 2019 г., льдов было больше в районах морей Уэдделла, Беллинсгаузена, Космонавтов, Дейвиса и Моусона. Сплоченность льдов продолжает оставаться 10 баллов и отличается только вдоль восточной части материка, где в 2019 г. они имеют меньшую сплоченность (6–8 баллов).

Следующие карты (рис. 4, в, г) показывают площади и сплоченности льда в начале сентября 2016 г. и в конце августа 2019 г. Визуально наблюдается равномерное увеличение площадей, покрытых льдами, по всему побережью. В 2016 и 2019 гг. они доходят до 54° ю.ш. Различия наблюдаются в районе моря Росса, в 2016 г. здесь льдов больше, и они доходят до 58° ю.ш., а в 2019 г. до 62° ю.ш. Также видны отличия в море Космонавтов, где в 2016 г. лед распространился до 62° ю.ш., а в 2019 г. только до 58° ю.ш. В оба рассматриваемых года сплоченность льдов в августе на большей части равна 10 баллам.

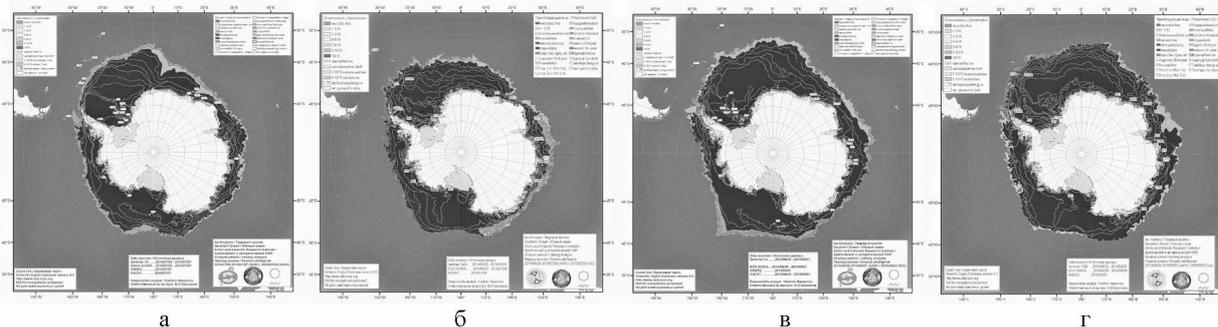


Рис. 4. Площади морского льда в Антарктиде [<http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=278>]: а) 07.07.2016; б) 04.07.2019; в) 01.09.2016; г) 29.08.2019

При сравнении карт за ноябрь 2016 г. (рис. 5, а) и 2019 г. (рис. 5, б) видно, что дальнейшего распространения льдов не происходит. Наблюдается уменьшение площади льдов в районе моря Беллинсгаузена, независимо от рассматриваемого периода. Также значительны изменения качества самого льда. Зрительно можно определить, что в 2016 г. в районе моря Уэдделла и моря Лазарева сплоченность льда уменьшается примерно на 40 % площади до 7–9 баллов, в отличие от 2019 г., когда она остается равной 10 баллам. Так же можно увидеть изменение сплоченности по всему восточному побережью: уменьшается в 2016 г. до 4 баллов, а в 2019 г. – местами до 3 баллов.

Последние из рассмотренных карт показывают льды в декабре 2016 и 2019 гг. (рис. 5, в, г). Здесь отмечено резкое уменьшение площади льда, который распространяется максимум до 59° ю.ш. в районе моря Уэдделла в оба рассматриваемых периода. Сплоченность в 2016 г. меньше, чем в 2019 г., и колеблется от 1–3 баллов до 9 баллов, тогда как в 2019 г. только отдельными местами 4–6 баллов, а в основном наблюдается 9–10 баллов. Независимо от года все восточное побережье практически полностью освобождается ото льда. Заметна разница только в море Лазарева, в 2016 г. оно практически полностью освобождено ото льда, тогда как в 2019 г. покрыто льдом от 59° ю.ш. до 64° ю.ш.

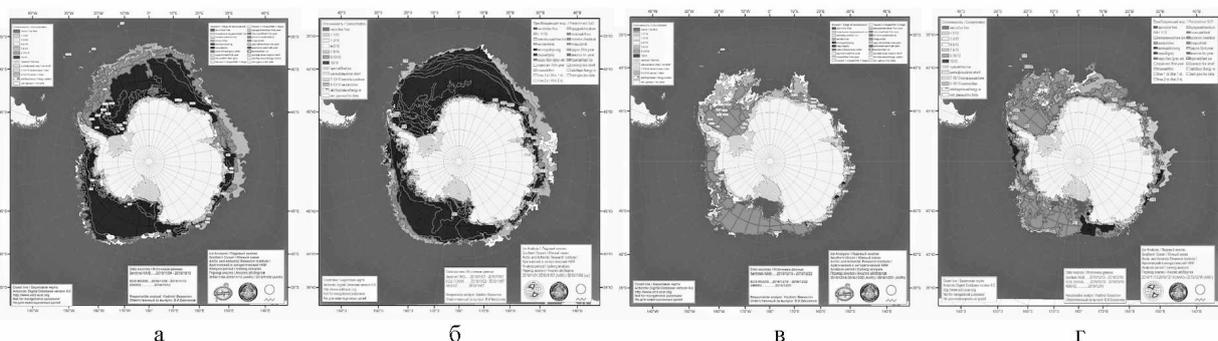


Рис. 5. Площади морского льда в Антарктиде [<http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=278>]: а) 10.11.2016; б) 07.11.2019; в) 22.12.2016; г) 19.12.2019

В ходе проделанной работы подтверждается закономерность: несмотря на различия по сплоченности и общей распространенности льдов цикл внутри года не меняется, то есть максимум площади приходится на сентябрь, а минимум на февраль. Два подробно рассмотренных нами года представляют собой минимальный и максимальный пики площадей льда за период с 2015 по 2019 г.

Список литературы

Спутниковый климатический мониторинг [Электронный ресурс] // ФГБУ «НИЦ «Планета»»: Климатические данные : Изменение площади морского льда в Антарктике (2002–2019). URL : https://planet.iitp.ru/climate/2019/03_ice_antarctic_2019_rus.jpg (дата посещения 21.02.2020).

AARI-NIC-NMI pilot project on integrated sea ice analysis for Antarctic waters [Электронный ресурс] // ФБГУ ААНИИ : Оперативные данные : Циркумполярные ледовые карты Южного океана. URL : <http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=278> (дата обращения: 21.02.2020).

ANALYSIS OF ANTARCTIC CIRCUMPOLAR ICE MAPS

E. Kruglova, O. Mekhova

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

The purpose of this work is to analyze the patterns of seasonal changes in the sea ice of Antarctica. The paper compares the state of ice in 2016 and 2019. As a result, it is concluded that these changes are cyclical over a year.

ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ПРОТЯЖЕННОСТИ ЗАТОПЛЕНИЙ/ОСУШЕНИЙ ПОБЕРЕЖЬЯ АЗОВСКОГО МОРЯ ПРИ СГОННО-НАГОННЫХ ВЕТРАХ

Т. Я. Шульга¹, О. В. Матузева²

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь*

² *Севастопольский государственный университет, Севастополь*

В работе исследованы сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря, возникающие во время длительных атмосферных воздействий одного типа и являющиеся причиной наводнений/осушений в прибрежных районах. На основе анализа результатов трехмерной гидродинамической модели *Princeton Ocean Model* созданы пространственные карты и справочные массивы данных протяженности затопления/осушения побережья Азовского моря, позволяющие оценить опасные последствия сгонно-нагонных процессов. Показано, что при длительных ветрах различных направлений наибольшие отклонения уровня моря возникают в Таганрогском заливе, являясь здесь причиной частых наводнений.

Мелководное континентальное Азовское море является полузамкнутым внутренним водоемом площадью ~39 тыс. км² со средней глубиной ~7 м [Гидрометеорология..., 1991], занимает промежуточное положение между морскими и пресными водоемами [Книпович, 1926; Книпович, Брегман, 1937]. На основании многолетних наблюдений известно, что сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря происходят чаще всего осенью и весной при преобладающих здесь восточных, северо-восточных, западных и юго-западных ветрах, совпадающих с направлением наибольшей протяженности моря [Гидрометеорология..., 1991]. Значительные сгонно-нагонные колебания уровня моря являются причиной возникновения затоплений/осушений участков побережья и сопровождаются при сгонах обмелением фарватеров, при нагонах – затоплением островов, берегов, разрушением портовых сооружений [Михайлов, 2010]. Промышленная и хозяйственная деятельность

на морском шельфе требует прогнозирования экстремальных гидрологических явлений и в связи с ограниченным числом прибрежных гидрометеостанций и наблюдений обуславливает применение численного моделирования как основного инструмента исследований.

В данной работе обсуждается метод расчета предельных значений проникновения/отхода морской воды от береговой линии, обусловленного сгонно-нагонными процессами в Азовском море. Результаты трехмерного гидродинамического моделирования *Princeton Ocean Model (POM)* [Blumberg, Mellor, 1987] позволили выполнить анализ скорости течений и сгонно-нагонных колебаний уровня моря, создать массивы справочных данных и прогностические карты затопления/осушения прибрежных территорий Азовского моря в зависимости от скорости и направления стационарного атмосферного воздействия.

Информация об используемой модели и ее параметрах. Неоднородное распределение глубин в Азовском море (в южной его части до 19 м и 0,5–4 м в прибрежных районах – Таманском и Динском заливах) обуславливает необходимость использования математических моделей со специальными криволинейными координатными сигма-координатами. Моделирование выполнено с использованием модели POM, предложенной в [Blumberg, Mellor, 1987], реализующей решение системы примитивных уравнений гидродинамики, записанных в приближениях несжимаемости, гидростатики и Буссинеска. Параметризация коэффициентов вертикальной вязкости и турбулентной диффузии выполнена в соответствии с дифференциальной моделью Меллора – Ямады [Mellor, Yamada, 1982], коэффициента горизонтальной вязкости – с использованием модели подсеточной вязкости [Smagorinsky, 1963]. Принято допущение о равенстве нулю нормальной составляющей скорости на дне пролива и придонных касательных напряжениях, связанных со скоростью по логарифмическому закону. На боковых границах выполняются условия непротекания. Также предполагается, в начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществлен в соответствии с критерием устойчивости Куранта для баротропных волн [Courant et al., 1967].

Расчеты проведены на прямолинейной горизонтальной сетке с пространственным разрешением ~ 1 км и на вертикальной сетке σ с 11 слоями. Исходными данными для моделирования является информация о батиметрии и конфигурации береговой линии Азовского моря, полученная путем оцифровки карт Гидрографической службы, очерчивающей всю территорию исследуемого бассейна (44,5°–48° с.ш. и 34°–40,02° в.д.). Моделирование выполняется с учетом водообмена с Черным морем с использованием условия свободного прохождения жидкости через пролив [Иванов и др., 2012; Черкесов, Шульга, 2017]. Расчетная область включает Азовское море и Керченский пролив с жидкой границей, проходящей вдоль 45,25° с.ш. Массив глубин Азовского моря, снятый с навигационных карт и заданный в стандартной географической системе координат, переводится на модельную область путем пространственной интерполяции.

Анализ и обсуждение результатов. Численные эксперименты выполнены с использованием наиболее простой модели ветрового воздействия – стационарного однородного по пространству ветра. Модель ветра воспроизводит идеализированный квазистационарный ветер, изменение со временем компонент скорости $W_{st}(t)$ выполняется по закону, предложенному в [Черкесов, Шульга, 2017]. Здесь задается модуль скорости ветра ($|W|_{st}^1 = 5$, $|W|_{st}^2 = 10$, $|W|_{st}^3 = 15$ и $|W|_{st}^4 = 20$ м/с) и его направление по значению угла с отсчетом от севера по часовой стрелке: северному направлению будет соответствовать 0° (360°), северо-восточному – 45°, восточному – 90°, южному – 180°, западному – 270°.

На рис. 1 схематически представлены макеты областей осушения и затопления в прибрежном районе моря. Здесь ось x с невозмущенной морской поверхностью; OO_1 – уровень моря в момент максимального сгона (см. рис. 1, слева) или OO_1 – уровень моря в момент максимального нагона (см. рис. 1, справа); α – угол наклона берегового склона; β – угол подъема береговой поверхности, которая в рассматриваемом случае предполагается плоской.

Для нахождения размеров области осушения $BB_1 \sim BO_1$ воспользуемся известным соотношением геометрии $BO_1 = (OO_1^2 + OO_1^2 \operatorname{tg}^{-2} \alpha)^{1/2}$, из которого следует $BO_1 = OO_1 \sin^{-1} \alpha$. По известным значениям максимального сгона OO_1 и углу наклона берегового склона (α) определяется расстояние от береговой линии до границы возможной области осушения (BB_1) в данном районе. Аналогично запишем соотношение, позволяющее найти протяженность района затопления $BB_1 \sim OB_2$: при $BO_1 = (OO_1^2 + OO_1^2 \operatorname{tg}^{-2} \beta)^{1/2}$. $BO_2 = OO_1 \sin^{-1} \beta$. Тогда по известному значению величины нагона OO_1 и углу подъема береговой поверхности (β) определяем удаленность границы возможной области затопления (BB_1) от береговой линии в данном районе. Отметим, что для Азовского моря

характерными являются величины углов наклона и подъема побережья от 1° до 4° . Придавая α и β указанные значения, получим прогноз размеров областей затопления и осушения в зависимости от направления и скорости длительно действующего квазистационарного ветра.

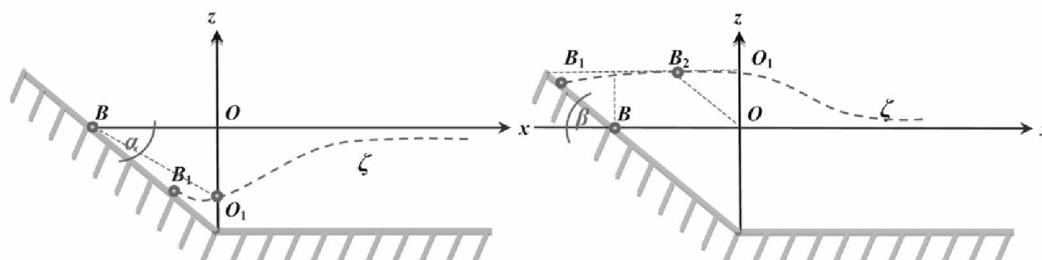


Рис. 1. Геометрия рельефа дна и схема области осушения (слева), затопления (справа)

Результаты моделирования, целью которого являлся прогноз значений проникновения морской воды на побережье или ее отступления от береговой черты, приведены на карте (рис. 2). Здесь отражены предельные значения линейных размеров затоплений/осушений, полученные при наименьших углах наклона/подъема берегового склона и наибольшей скорости ($|W|_{st}^4 = 20$ м/с) действующего квазистационарного ветра четырех основных направлений. Положительные значения приведенных данных отражают размеры границы проникновения морской воды от береговой линии (затопления), отрицательные – размеры границы осушения. Аналогичные таблицы значений протяженности области затоплений/осушений составлены для других скоростей ветра и углах наклона/подъема берегового рельефа.

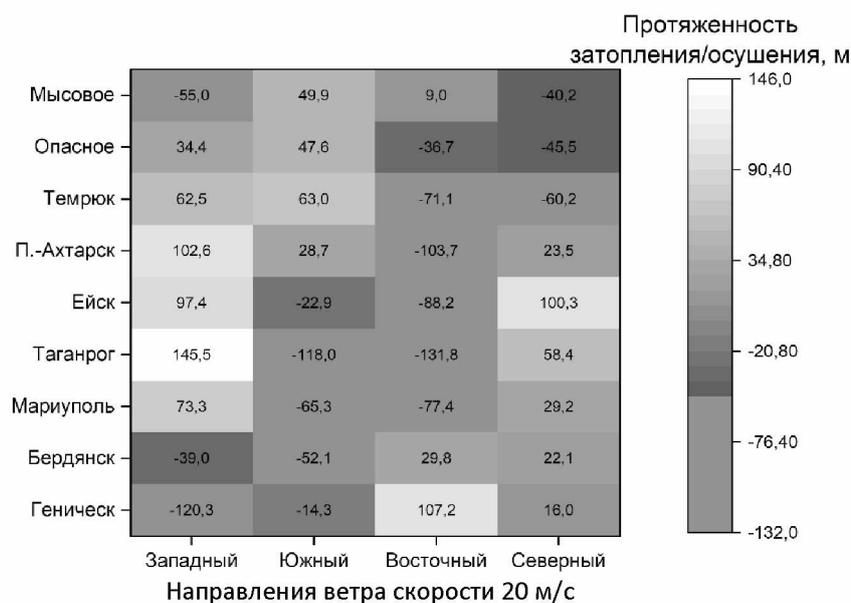


Рис. 2. Линейные размеры областей осушения (положительные значения) и затопления (отрицательные значения) на береговых станциях Азовского моря при наименьших углах наклона/подъема побережья ($\alpha = \beta = 1^\circ$) в зависимости от направления длительно действующего ветра скорости 20 м/с

Анализируя представленные результаты, отметим, что наибольшему воздействию сгонно-нагонных процессов подвержен Таганрогский залив, максимальные отклонения уровня моря возникают здесь при ветрах различных направлений, что в свою очередь приводит к наибольшему затоплению или осушению береговых районов, прилежащих к этому заливу.

Пространственные карты, представленные на рис. 3, демонстрируют расположение области возможных затоплений побережья Азовского моря, вызываемых квазистационарным ветром, действующим в зональном направлении с востока на запад со скоростью 20 м/с, для наиболее пологого склона ($\alpha_1 = 1^\circ$).

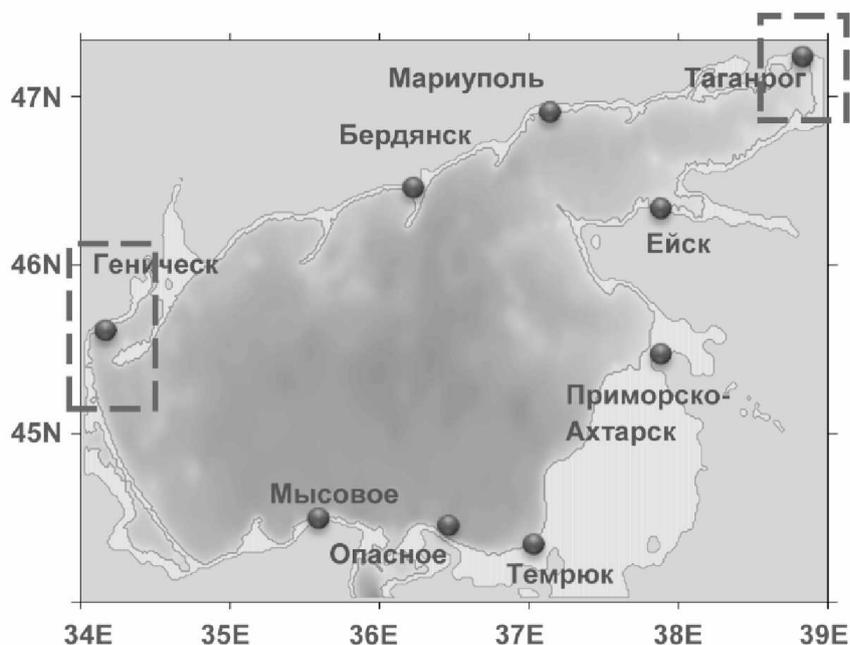


Рис. 3. Области возможных затоплений побережья Азовского моря, генерируемых восточным ветром скорости 20 м/с

На рис. 4 показаны области возможных затоплений и осушений в районе Таганрога и Геническа, генерируемых западным/восточным ветром скорости 20 м/с, в зависимости от угла наклона/подъема берегового склона. На рис. 4 границы осушения – при $\beta_1 = 1^\circ$, $\beta_2 = 2^\circ$, $\beta_3 = 3^\circ$ и границы затопления – при $\alpha_1 = 1^\circ$, $\alpha_2 = 2^\circ$, $\alpha_3 = 3^\circ$.

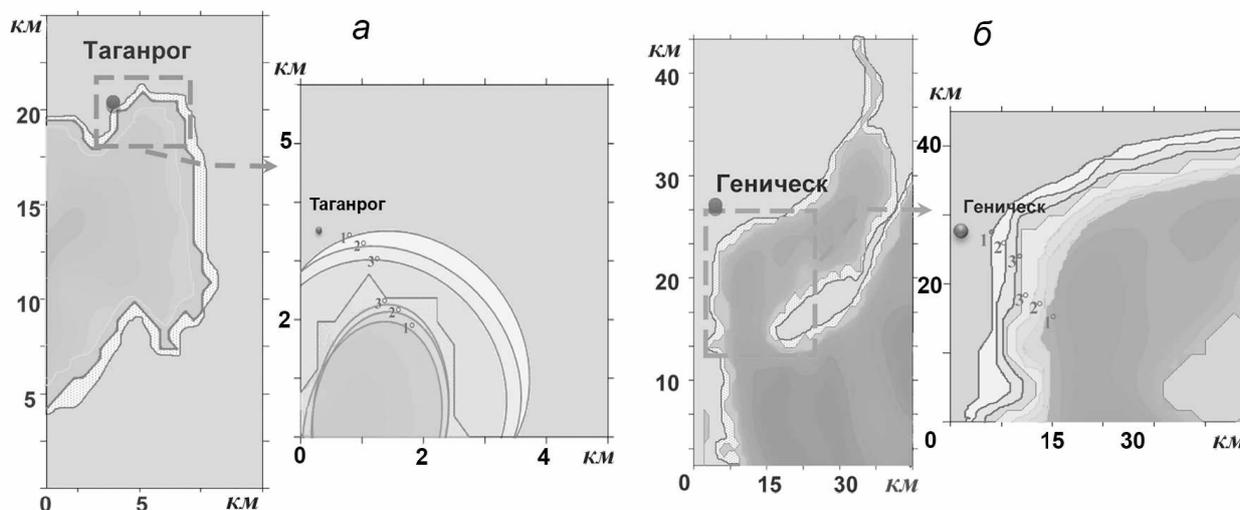


Рис. 4. Области возможных затоплений и осушений в районе Таганрога (а) и Геническа (б), вызываемых однородным западным/восточным ветром скорости 20 м/с, в зависимости от угла наклона/подъема берегового склона

Заключение. В работе представлен подход, основанный на численном анализе сгонно-нагонных процессов в Азовском море, применяемый для оценки взаимодействия колебаний уровня моря с берегом. На основе данных трехмерного гидродинамического моделирования созданы новые справочные массивы данных и прогностические карты затопления/осушения побережья Азовского моря. Выполнен прогноз опасных последствий сгонно-нагонных процессов на побережье, возникающих при длительном действии ветра различных скоростей и направлений.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2020-0004, а также при поддержке научного проекта РФФИ № 18-05-80025.

Список литературы

- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. V. Азовское море. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 236 с.
- Книпович Н. М.* Работа Азовской научно-промысловой экспедиции в 1922–1924 гг. (предварительный отчет) // Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. Керчь, 1926. Вып. 1. С. 4–51.
- Книпович Н. М., Брегман Г. Р.* Гидрологический справочник морей СССР. Л.; М.: Гидрометеорологическое издательство, 1937. Т. 3, вып. 2. С. 229–463.
- Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование влияния переменного по пространству и времени ветра на течения, сгонно-нагонные процессы и распространение примеси в Азовском море // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 8. С. 69–79.
- Михайлов В. Н., Магрицкий Д. В., Иванов А. А.* Гидрология дельты и устьевое взморье Кубани. М.: ГЕОС, 2010. 728 с.
- Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Волны, течения, сгонно-нагонные процессы и трансформация загрязнений в Азовском море. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. 228 с.
- Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model // *Three-Dimensional Coastal Ocean Models* / Ed. N. Heaps. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1987. P. 1–16.
- Courant R., Friedrichs K., Lewy H.* On the partial difference equations of mathematical physics // *IBM Journal of Research and Development*. 1967. Vol. 11, N 2. P. 215–234.
- Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. Vol. 20, N 4. P. 851–875.
- Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* 1963. Vol. 91, N 3. P. 99–164.

PREDICTIVE SIMULATION OF THE DURATION OF WIND-INDUCED FLOODING/DRYING OF THE SEA OF AZOV COAST

T. Shul'ga¹, O. Matuzaeva²

¹ *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol*

² *Sevastopol State University, Sevastopol*

This paper examines the wind-induced fluctuations of the Sea of Azov water level that occur during long-term atmospheric impacts of the same type and cause floods/dry-ups in coastal areas. Based on the analysis of the results of the three-dimensional hydrodynamic Princeton Ocean Model, spatial maps and reference data sets on flooding/drying of the coast of the Sea of Azov were created, permitting us to assess the dangerous consequences of surge phenomena. It is demonstrated that during long-duration winds from varying directions, sea level fluctuations are the greatest in Taganrog Bay, causing frequent floods there.

Научное издание

**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ: ИЗУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ
(школа-практика)**

Материалы VI Международной конференции молодых ученых
1–5 сентября 2020 г., Петрозаводск

**WATER RESOURCES: RESEARCH AND MANAGEMENT
(School and Workshop)**

Proceedings of the 6th International Young Scientists Conference
September 1–5, 2020, Petrozavodsk

*Печатается по решению Ученого совета
Института водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Ответственный за выпуск *Н. Е. Галахина*
Редактор *Е. В. Азоркина*
Английский текст *О. С. Кислова*
Оригинал-макет *Н. Н. Сабанцева*
Оформление обложки *А. В. Толстиков*

Подписано в печать 20.08.2020 г. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 19,4. Усл. печ. л. 22,09.
Тираж 300 экз. Заказ № 616.

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
Редакционно-издательский отдел
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50