

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр
Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 6, 2022

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

Петрозаводск
2022

Главный редактор

А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; И. В. ДРОБЫШЕВ, доктор биологии (Швеция – Канада); Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; Х. ЙООСТЕН, доктор биологии, проф. (Германия); А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Н. В. ЛУКИНА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; О. ОВАСКАЙНЕН, доктор математики, проф. (Финляндия); О. Н. ПУГАЧЕВ, академик РАН, д. б. н.; С. А. СУББОТИН, доктор биологии (США); Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Т. Э. ХАНГ, доктор географии (Эстония); П. ХЁЛЬТТЯ, доктор геологии, проф. (Финляндия); К. ШАЕВСКИЙ, доктор математики, проф. (Польша); В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия серии «Лимнология и океанология»

Н. Л. БОЛОТОВА, д. б. н., проф.; А. В. ЗИМИН, д. г. н.; В. Н. ЗЫРЯНОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. В. ИЛЬМАСТ, д. б. н.; С. Д. ГОЛОСОВ, к. ф.-м. н.; С. Ф. КОМУЛАЙНЕН, д. б. н.; А. В. КУРАЕВ, к. г. н.; Е. А. КУРАШОВ, д. б. н.; М. ЛЕППЯРАНТА, доктор; Л. Е. НАЗАРОВА (зам. ответственного редактора), к. г. н.; И. Ш. НОРМАТОВ, д. х. н., проф.; Л. А. ПЕСТРЯКОВА, д. г. н.; Т. И. РЕГЕРАНД (ответственный секретарь), к. б. н.; А. В. РЫЖАКОВ, к. х. н.; А. А. ТЕРЖЕВИК, к. т. н.; А. П. ФЕДОТОВ, д. г.-м. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ (ответственный редактор), чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.; Г. Т. ФРУМИН, д. х. н., проф.

Издается с января 2009 г.

Адрес редакции: 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
Тел. (8142)762018; факс (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

**of the KARELIAN RESEARCH CENTRE
of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES**

No. 6, 2022

LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY

Petrozavodsk
2022

Editor-in-Chief

A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); I. V. DROBYSHEV, PhD (Biol.) (Sweden – Canada); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; T. E. HANG, PhD (Geog.) (Estonia); P. HÖLTTÄ, PhD (Geol.), Prof. (Finland); E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; H. JOOSTEN, Dr. (Biol.), Prof. (Germany); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); N. V. LUKINA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; O. OVASKAINEN, PhD (Math.), Prof. (Finland); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SUBBOTIN, PhD (Biol.) (USA); D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); K. SZAJEWSKI, PhD (Math.), Prof. (Poland); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the «Limnology and oceanology» Series

N. L. BOLOTOVA, DSc (Biol.), Prof.; A. P. FEDOTOV, DSc (Geol.-Miner.); N. N. FILATOV (Editor-in-Charge), RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; G. T. FRUMIN, DSc (Chem.), Prof.; N. V. IL'MAST, DSc (Biol.); S. D. GOLOSOV, PhD (Phys.-Math.); S. F. KOMULAINEN, DSc. (Biol.); A. V. KURAEV, PhD (Geog.); E. A. KURASHOV, DSc (Biol.); M. LEPPYARANTA, PhD; L. E. NAZAROVA (Deputy Editor-in-Charge), PhD (Geog.); I. Sh. NORMATOV, DSc (Chem.), Prof.; L. A. PESTRYAKOVA, DSc (Geog.); T. I. REGERAND (Executive Secretary), PhD (Biol.); A. V. RYZHAKOV, PhD (Chem.); A. A. TERZHEVIK, PhD (Tech.); A. V. ZIMIN, DSc (Geog.); V. N. ZYRYANOV, DSc (Phys.-Math.).

Published since January 2009

8 issues a year

Editorial Office address: 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Tel. (8142)762018; fax (8142)769600

E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Full-text electronic version: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

От редактора

Представляем вашему вниманию выпуск серии «Лимнология и океанология», подготовленный по результатам Международной научно-практической конференции с участием представителей стран СНГ «Оценка состояния ресурсов, экосистем озер и морей в условиях современных изменений климата и социо-экономического развития», проходившей в сентябре 2022 г. в Петрозаводске.

Конференция приурочена к 300-летию Российской академии наук, которое будет отмечаться в 2024 г., и включена в список посвященных этому событию юбилейных мероприятий Отделения наук о Земле РАН. Данное мероприятие с участием ведущих университетов России и работавшей в его рамках секции «Наука – образованию», подготовленной совместно с Петрозаводским государственным университетом, соответствует задачам «Десятилетия науки и технологий 2022–2031», объявленного президентом России В. В. Путиным, основными из которых являются привлечение талантливой молодежи в научную сферу, вовлечение исследователей и разработчиков в решение важнейших задач развития общества и страны, повышение доступности информации о достижениях и перспективах отечественной науки для граждан России.

Важным направлением конференции было также укрепление сотрудничества в сфере науки со странами СНГ. В мероприятии приняли участие представители Таджикистана (Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана и Таджикский национальный университет), Узбекистана (Научно-информационный центр Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии), Абхазии (Институт экологии Академии наук Абхазии).

В настоящем выпуске в связи с тематикой конференции к традиционным разделам серии добавлен новый раздел «Оценка рекреационного потенциала». Подробнее о мероприятии, успешно проведенном благодаря сотрудничеству коллег из более чем 52 организаций науки и высшего образования, можно прочитать в разделе «Хроника».

Благодарим всех участников конференции и авторов статей данного выпуска.

Н. Н. Филатов

УДК 550.361

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИДОННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОЗЕРАХ ОСТРОВА БОЛЬШОЙ СОЛОВЕЦКИЙ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ О НАЛИЧИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ

С. В. Черкасов^{1*}, И. М. Фархутдинов^{1,2}

¹ Государственный геологический музей им. В. И. Вернадского РАН
(ул. Моховая, 11, стр. 11, Москва, Россия, 125009), *s.cherkasov@sgm.ru

² ООО «РН-БашНИПНефть» (ул. Бехтерева, 3, стр. 1, Уфа, Республика
Башкортостан, Россия, 450103)

Рассмотрены результаты эксперимента по оценке геотермального потенциала территории на основе замеров придонных температур водоемов. Исследования проведены в 2021 г. на острове Большой Соловецкий, который характеризуется, с одной стороны, наличием геотермальной аномалии (по некоторым данным), а с другой – большим количеством озер. Для озер глубиной более 5 м результаты температурных измерений указывают на соответствие температурных профилей димиктического типу озер – с двумя периодами циркуляции, весной и осенью. В ходе эксперимента в озерах Большое Красное и Щучье выявлены аномальные значения придонных температур на глубинах более 15 м: 5,16–5,26 °С для озера Щучье и 6,16–6,56 °С для озера Большое Красное. Рассмотрены возможные причины выявленных аномалий, в том числе химические реакции в слое придонных осадков, повышенный тепловой поток в верхней части земной коры и ветровое перемешивание в озерах. Даны рекомендации по дальнейшему изучению аномалий с целью уточнения их природы.

Ключевые слова: геотермальная энергетика; геотермальные ресурсы; возобновляемые источники энергии; Соловецкие острова; температурный режим озер

Для цитирования: Черкасов С. В., Фархутдинов И. М. Эксперимент по использованию придонных температурных измерений в озерах острова Большой Соловецкий для проверки гипотезы о наличии геотермальной аномалии // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 6–15. doi: 10.17076/lim1513

Финансирование. Исследования профинансированы ООО «Нефть-Сервис».

S. V. Cherkasov^{1*}, I. M. Farkhutdinov^{1,2}. EXPERIMENTAL APPLICATION OF BOTTOM TEMPERATURE MEASUREMENTS IN LAKES OF BOLSHOY SOLOVETSKY ISLAND TO TEST THE GEOTHERMAL ANOMALY HYPOTHESIS

¹ Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences
(11/11 Mokhovaya St., 125009 Moscow, Russia), *s.cherkasov@sgm.ru

² RN-BashNIPIneft, LLC (3/1 Bekhtereva St., 450103 Ufa, Republic of Bashkortostan,
Russia)

The article reports the results of an experiment to assess the geothermal potential of the territory based on measurements of water reservoirs' bottom temperatures. The research was conducted in 2021 on Bolshoy Solovetsky Island, which, according to some data, is characterized by the presence of geothermal anomaly on the one hand, and has a large number of lakes on the other. For lakes with depths greater than 5 m, the results of temperature measurements indicate that the temperature profiles correspond to the dimictic type of lakes – with two periods of circulation in spring and autumn. During the experiment, abnormal values of bottom temperatures at depths of more than 15 m were detected in Lakes Bolshoe Krasnoe and Shchuchye: 5.16–5.26 °C for Lake Shchuchye, and 6.16–6.56 °C for Lake Bolshoe Krasnoe. The possible causes of these anomalies are discussed including: chemical reactions in the near-bottom sediment layer, increased heat flow in the upper part of the Earth's crust, and wind mixing in the lakes. Recommendations are given for further study of the anomalies in order to clarify their nature.

Keywords: geothermal energy; geothermal resources; renewable energy sources; Solovetsky Islands; temperature regime of lakes

For citation: Cherkasov S. V., Farkhutdinov I. M. Experimental application of bottom temperature measurements in lakes of Bolshoy Solovetsky Island to test the geothermal anomaly hypothesis. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 6–15. doi: 10.17076/lim1513

Funding. The study was funded by Oil-Service company.

Введение

Во всем мире большое внимание уделяется развитию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), использование которых, в частности, позволит снизить спрос на углеводороды и сократить выбросы парниковых газов [Renewable..., 2018]. Одним из видов ВИЭ являются геотермальные ресурсы, которыми Россия обладает в значительной мере [Cherkasov et al., 2015]. Использование геотермальных ресурсов особенно актуально и экономически выгодно на удаленных территориях с неразвитой инфраструктурой, где геотермальная энергетика может обеспечить локальную генерацию тепла и электричества. Также геотермальные ресурсы представляют собой наиболее экологически чистый возобновляемый источник энергии, не зависящий от погодных условий [Черкасов и др., 2021].

В то же время использование геотермальных ресурсов на удаленных территориях обычно требует приложения существенных усилий, связанных с необходимыми геолого-геофизическими исследованиями, поскольку такие территории, как правило, труднодоступны и геологически слабо изучены, в том числе с точки зрения геотермальных характеристик земной коры. Наиболее объективным методом оценки геотермальных характеристик верхней части земной коры являются термометрические измерения в скважинах и горных выработках, однако во многих случаях на удаленных территориях последние отсутствуют, а бурение в труднодоступном

регионе для решения задач геотермии не представляется целесообразным.

Существующие альтернативные методы оценки теплового потока и температуры в верхней части земной коры, такие как дистанционное зондирование и наземные электромагнитные измерения, используются для построения мелкомасштабных карт геотермальных характеристик, но не позволяют выделять локальные тепловые аномалии. Для детальных исследований применяются метод редукции температурных волн (РТВ) и «озерный» метод. Метод РТВ позволяет определять тепловой поток с помощью учета периодических и непериодических изменений температуры земной поверхности [Гордиенко, 1982] на небольших глубинах (в скважинах глубиной 5–10 м) в зоне сезонных колебаний температуры и интенсивного водообмена. Этим методом изучены тепловые потоки и температуры в пределах зоны аэрации на значительной территории Украины. В России метод применялся лишь на ограниченных площадях в опытный порядок [Богуславский, 2020].

Применение «озерного» метода представлено единичными исследованиями. На данный момент известны результаты измерения геотермального градиента в донных отложениях озер [Рянжин, 1992], известны попытки оценки геотермального потока путем замера придонных температур в озерах. Так, измерения придонных температур воды на озере Байкал позволили выделить области аномального теплового потока от дна озера [Шахвердов, Шах-

вердова, 2018]. Обе модификации «озерного» метода являются пионерными и сколько-нибудь широкого применения не получили. В данной работе ставилась задача проверки гипотезы о наличии геотермической аномалии посредством измерения придонных температур водоемов острова Большой Соловецкий.

В населенном пункте, расположенном на острове, энергогенерация осуществляется за счет дизельной электростанции, топливо для которой завозится морем. Транспортные расходы существенно увеличивают стоимость топлива и стоимость производимой энергии [Кангаш, Марьяндышев, 2019]. Износ электросетей превышает 60 %, на отдельных участках – 80 %, в том числе износ энергооборудования трансформаторных подстанций [Гашо и др., 2020].

Рядом исследователей высказывалась гипотеза о повышенном геотермальном потоке под Соловецким архипелагом, которая основана на исследованиях биоценоза, нехарактерного для данной широты, а также на некоторых геологических и геофизических признаках [Природная..., 2007]. Так, фоновый тепловой поток на архипелаге, по подсчетам Ю. Г. Шварцмана, составил 50–55 мВт/м², что в 1,5 раза выше по сравнению с соседними районами Русской плиты [Методические..., 1983; Шварцман, 2001]

Кондиционных измерений плотности теплового потока в геотермозоне (ниже нейтрального слоя) на Соловецком архипелаге пока не получено, т. к. глубокие скважины не бурились.

В основе проведенного эксперимента лежит предположение о том, что при наличии геотермической аномалии придонные темпера-

туры в димиктических озерах острова должны иметь значения выше, чем классические 4 °С.

Материалы и методы

В состав Соловецкого архипелага входят шесть относительно крупных и свыше 110 мелких островов. Самый крупный из островов – Большой Соловецкий (225,28 км²). Его протяженность с севера на юг 24 км, с запада на восток – 16 км, длина изрезанной береговой линии 181 км.

Кристаллический фундамент Соловецких островов архей-протерозойского возраста представляет собой горст, разбитый разломами. Для островов характерен изостатический подъем суши со средней скоростью 1,1 мм/год [Гидрометеорология..., 1991]. Соловецкие острова расположены в пределах Кандалакшской рифтовой зоны Кольско-Беломорской рифтогенной области распространения карелид Балтийского щита на северо-восточной границе с Русской плитой [Москалева и др., 1993].

Полевые работы осуществлялись с 26 июня по 18 июля 2021 г. коллективом сотрудников ГГМ РАН при финансовой поддержке ООО «Нефть-Сервис». В ходе исследования изучены все типы водоемов о. Большой Соловецкий: от малых – оз. Большое Красное с площадью зеркала 2,743 км² до самых малых – оз. Иван и оз. Дарья с площадью менее 1 км². В ходе проведения работ осуществлена батиметрическая съемка. Затем в точках с наибольшей глубиной проводились зондирования температуры в толще воды от поверхности до дна («столбы») и замеры придонных температур. Замеры температур проводились с лодки (рис. 1). Измерение глубины (точность ± 50 мм) и температуры воды



Рис. 1. Проведение замеров с лодки

Fig. 1. Taking measurements from a boat

(точность $\pm 0,05$ °C) проводилось с помощью регистратора Solinst 3001 LTC Levellogger Edge M100 с платиновым резисторным датчиком температуры (RTD). При зондировании температуры регистратор спускался на кабеле прямого считывания (100 м) с периодически остановками (через 1,0 м) на фиксированной глубине, данные о температуре вносились после стабилизации. Регистрация температур на дне водоема осуществлялась с большей частотой (56 замеров придонных температур и 31 вертикальный профиль) [Никитин и др., 2021].

Результаты и обсуждение

После получения данных замеров температур исследованных озер и вынесения их на карту (рис. 2) были построены термограммы (рис. 3, 4) [Cherkasov et al., 2021]. Для глубоких димиктических озер термограммы характеризуются сходной моделью распределения температур по глубине – инсоляционным прогревом приповерхностного слоя (от 1 до 6 м) и резким спадом температур с последующим снижением градиента, вплоть до выхода на изотермический режим.

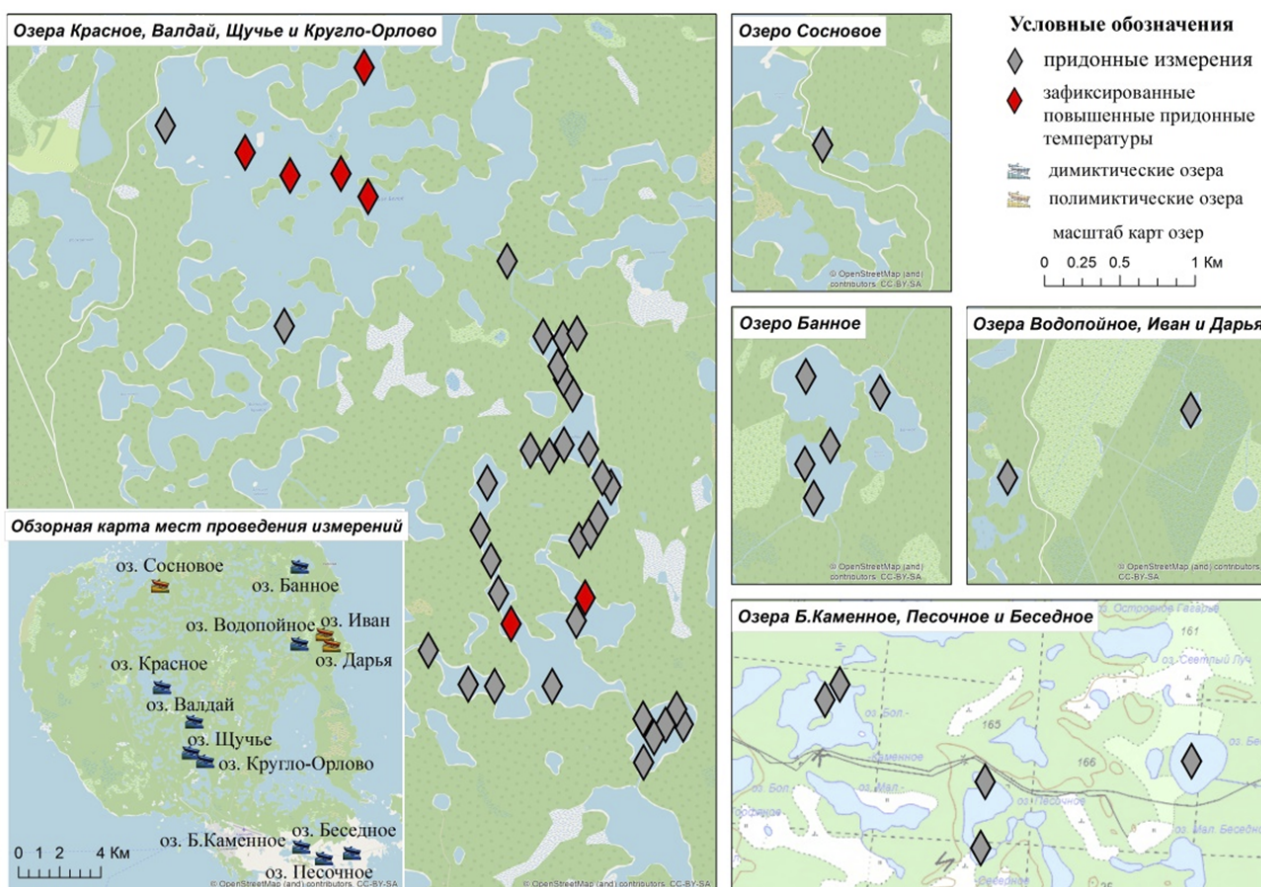


Рис. 2. Карта замеров придонных температур о. Большой Соловецкий

Fig. 2. Map of the measurements of bottom temperatures of Bolshoy Solovetsky Island

В ходе полевых работ получена 31 термограмма для глубин от 2 до 25 м с интервалом 1 м по глубине, в общей сложности – 408 измерений температуры. Кроме этого, в 56 точках измерены только придонные температуры на глубинах от 0,8 до 30,5 м. Таким образом, всего выполнено 464 измерения температуры в 10 озерах [Cherkasov et al., 2021].

Вид типичной термограммы для глубоких озер, где глубина обеспечивает выход на изотермический придонный режим, приведен на рис. 3 (озеро Валдай).

Значения придонных измерений температуры приведены в таблице 1.

Аномалии придонной температуры выявлены в двух озерах, термограмма для озера

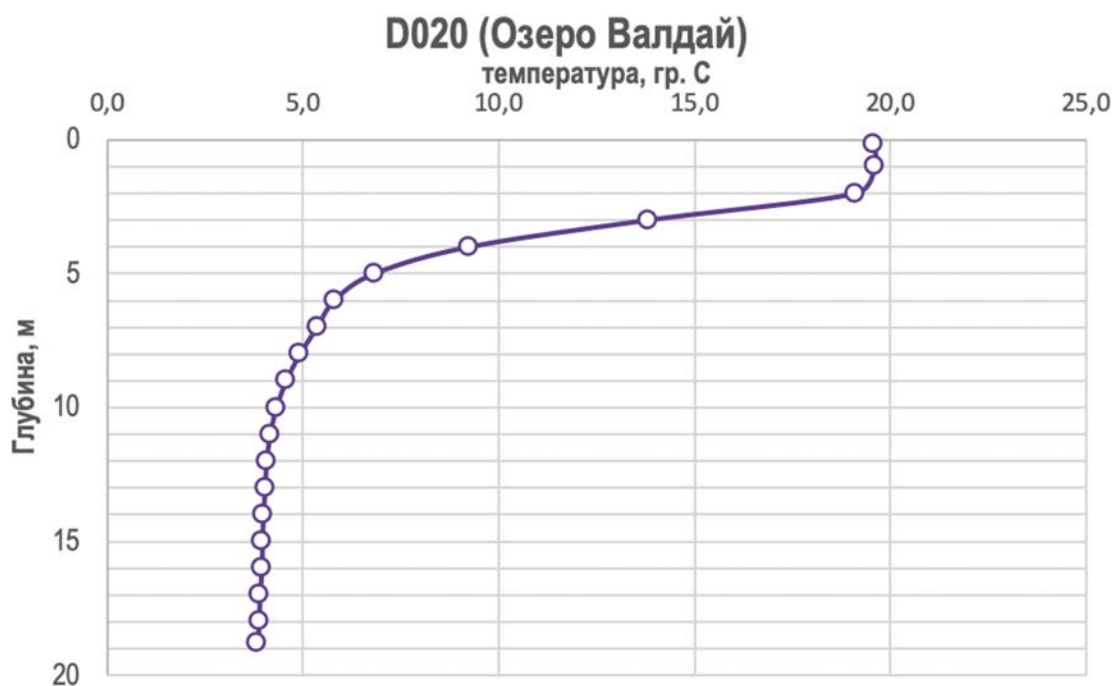


Рис. 3. Типичная термограмма для глубоких озер (на примере озера Валдай)
 Fig. 3. Typical thermogram for deep lakes (using the example of Lake Valdai)

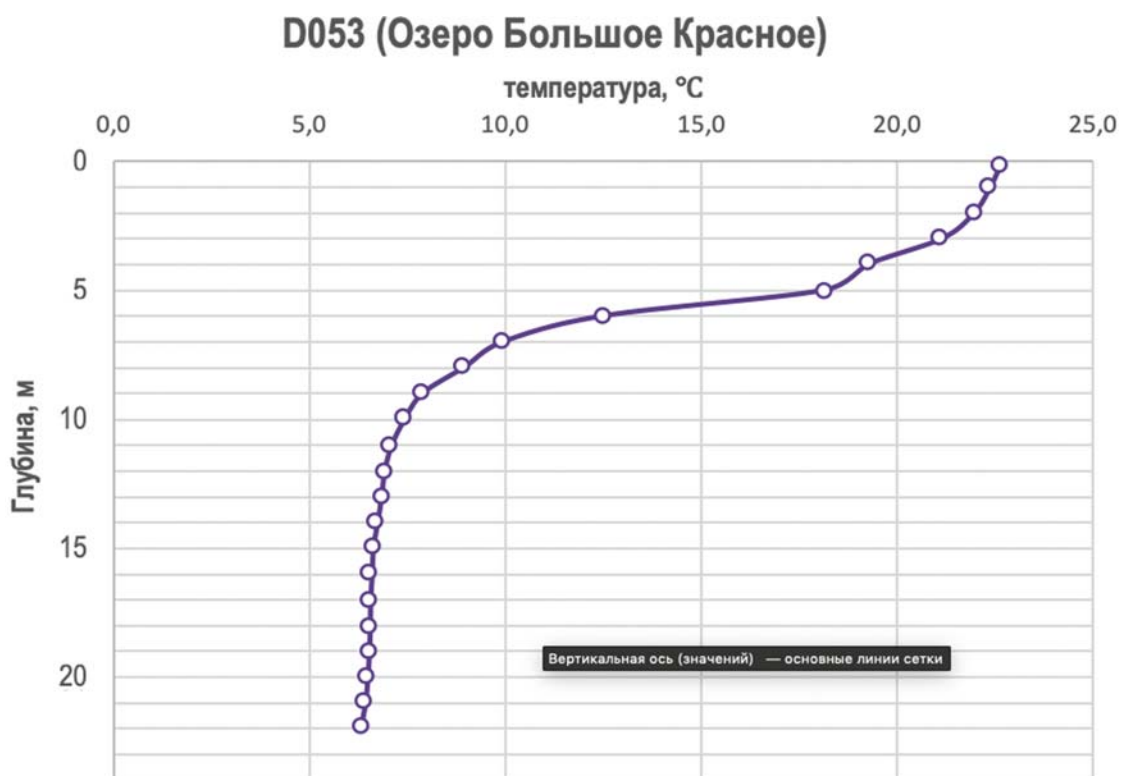


Рис. 4. Термограмма для озера с зафиксированной повышенной придонной температурой (на примере озера Большое Красное)
 Fig. 4. A thermogram for a lake with a fixed elevated bottom temperature (using the example of Lake Bolshoye Krasnoye)

Таблица 1. Придонные измерения температуры

Table 1. Bottom temperature measurements

N	Озеро / Lake	Точка наблюдений Observation point	Глубина Depth	Температура, °C Temperature, °C
1	Кругло-Орлово / Kruglo-Orlovo	D006	16	4,27
2	«	D007	11,5	4,7
3	«	D008	22,5	4,15
4	«	D009	13,7	4,39
5	«	D010	19	4,18
6	«	D011	6	6,25
7	Валдай / Valday	D012	10,1	5,35
8	«	D013	5	7,66
9	«	D014	7,5	5,61
10	«	D016	10,4	5,31
11	«	D017	5,1	6,71
12	«	D018	13,3	4,74
13	«	D019	14,3	4,09
14	«	D022	7	5,42
15	«	D023	0,8	18,35
16	«	D024	6,1	4,75
17	«	D025	15,8	3,72
18	«	D026	7,6	4,46
19	«	D027	9,5	4,15
20	«	D028	5,85	4,76
21	«	D029	15,7	4,21
22	«	D030	9,4	4,03
23	«	D031	0,9	18,71
24	Щучье / Shchuchye	D033	15,9	5,16
25	«	D034	17,05	5,12
26	«	D035	7,85	6,46
27	«	D036	3,6	13,3
28	«	D037	2,6	17,11
29	«	D038	2,7	17,1
30	«	D039	12,15	4,94
31	«	D042	13,1	4,38
32	«	D043	14,3	3,95
33	«	D044	9,4	4,02
34	«	D045	14,9	4,96
35	«	D047	11,4	5,69
36	«	D047	11,4	5,69
37	Б. Красное / B. Krasnoye	D048	4,3	9,44
38	«	D051	18,1	6,21
39	«	D052	17,8	6,15
40	«	D054	30,5	4,86
41	«	D055	16,5	6,56
42	«	D057	10	7,8
43	«	D058	19,3	6,16
44	«	D059	10,7	7,56
45	Иван / Ivan	D062	1,85	15,02
46	Водопойное / Vodopoynoye	D066	9,1	5,014
47	Банное / Bannoeye	D067	4,5	10,05
48	«	D068	5,3	9,33
49	«	D070	8,9	7,83
50	«	D072	4,5	11,43
51	«	D073	6,8	7,18
52	Б. Каменное / B. Kamennoye	D074	7,0	7,15
53	«	D076	11,4	5,61
54	Беседное / Besednoye	D079	5,9	8,88
55	Песочное / Pesochnoye	D080	5,4	8,29
56	«	D081	8,6	6,07

с зафиксированной повышенной придонной температурой приведена на примере озера Большое Красное (рис. 4), в котором на глубине 10–20 м придонные температуры были примерно на 2 °C выше, чем в других озерах (за исключением озера Щучье, по сравнению с ним – на 1 °C) (рис. 5). В озере Щучье, с одной стороны, на глубинах более 15 м температура

выше, чем в озерах Кругло-Орлово и Валдай, практически на 1 °C, с другой – в самом озере придонная температура иногда повышается с увеличением глубины озера, при этом измерения в отдельных столбах показывают уменьшение температуры с глубиной, что может свидетельствовать о наличии повышенной теплоотдачи ложа озера на отдельных участках.

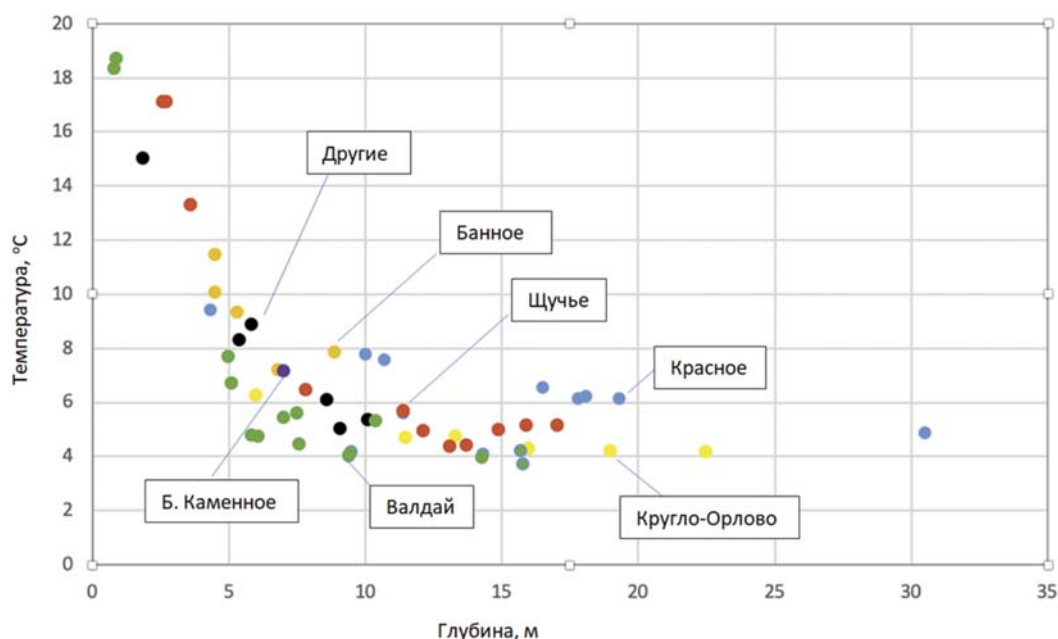


Рис. 5. Придонные температуры воды в озерах Б. Соловецкого острова. Цвет точек соответствует разным озерам, названия озер – в рамках

Fig. 5. Bottom water temperatures in the lakes of Bolshoy Solovetsky Island. The color of the dots corresponds to various lakes, the lakes names are given in boxes

В одном и том же озере на одинаковых глубинах в разных точках разброс температур может составлять до 1,2 (Валдай) и до 1,4 (Банное) °С.

Выявленные температурные аномалии в придонных слоях озер острова Большой Соловецкий могут быть обусловлены тремя факторами:

- придонными химическими реакциями в слое осадков (в сапропеле);
- различиями режимов ветрового перемешивания;
- повышенным тепловым потоком из недр.

Различие режимов ветрового перемешивания сказывается на глубине термоклина и, соответственно, на температуре нижних слоев воды в озерах. Это зависит от длины разгона и скорости ветра [Пальшин и др., 2008]. Выявленные аномалии на глубине более 15 м характерны для озер с наибольшей площадью (оз. Большое Красное – 2,7 км², оз. Щучье – 0,6 км²; табл. 2), поэтому данные аномалии могут быть вызваны различиями в режимах ветрового перемешивания озер.

Таблица 2. Площади озер о. Б. Соловецкий и выявленные температуры на разных глубинах (нет значения при отсутствии указанной глубины)

Table 2. The lake areas of Bolshoy Solovetsky Island and the detected temperatures at different depths

N	Озеро / Lake	Площадь, км ² Area, km ²	Температура на глубине 9 м, °С Temperature at a depth of 9 m, °C	Температура на глубине 15 м, °С Temperature at a depth of 15 m, °C
1	Сосновое / Sosnovoye	0,014	-	-
2	Иван / Ivan	0,021	-	-
3	Дарья / Darya	0,026	-	-
4	Водопойное / Vodopoynoye	0,043	4,56	-
5	Беседное / Besednoye	0,107	7,45	-
6	Песочное / Pesochnoye	0,109	6,61	-
7	Кругло-Орлово / Kruglo-Orlovo	0,128	4,67	4,24
8	Б. Каменное / B. Kamennoye	0,242	8,68	-
9	Валдай / Valday	0,273	5,23	3,96
10	Банное / Bannoye	0,335	6,69	-
11	Щучье / Shchuchye	0,596	5,62	4,97
12	Б. Красное / B. Krasnoye	2,699	8,43	6,62

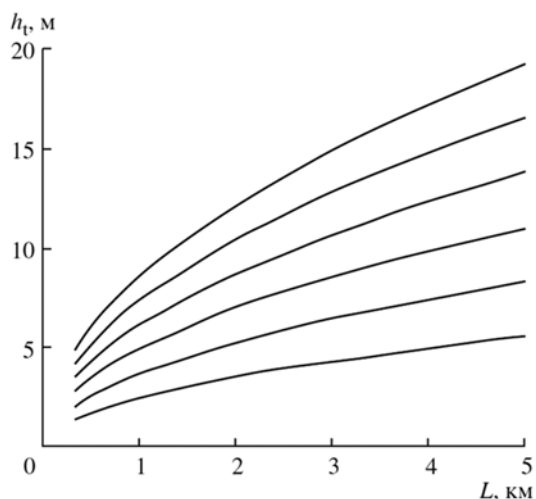


Рис. 6. Зависимость глубины термоклина от длины разгона и скорости ветра (кривые для $V = 4, 6, 8, 10, 12, 14$ м/с снизу вверх соответственно) [Пальшин и др., 2008]

Fig. 6. Dependence of the thermocline depth on the acceleration length and wind speed (curves for $V = 4, 6, 8, 10, 12, 14$ m/s from bottom to top, respectively) after [Palshin et al., 2008]

Коэффициент корреляции температуры и площади озер для глубин 9 м составил $R = 0,48$, для глубин 15 м — $R = 0,97$. Однако небольшое число исследованных озер о. Большой Соловецкий не позволяет говорить о данной корреляции с существенной долей достоверности. Также необходимо отметить тот факт, что даже для самого большого по площади озера Большое Красное глубина термоклина при максимальной скорости ветра должна составлять менее 15 м (рис. 6), в то время как температурная аномалия в этом озере наблюдается на глубине более 20 м.

Повышенные придонные температуры могут быть вызваны также теплообменом с донными осадками [Zdorovenkova et al., 2021].

Если же выявленные температурные аномалии не вызваны придонными химическими реакциями и ветровым перемешиванием, они свидетельствуют о наличии геотермической аномалии.

Заключение

Использование геотермальных ресурсов в РФ перспективно на удаленных территориях, где геотермальная энергетика может обеспечить локальную генерацию тепла и электричества. Однако применение геотермальных ресурсов на данных территориях сопровождается

рядом сложностей, в первую очередь — недостаточным количеством данных о геотермических характеристиках земной коры. В связи с тем, что бурение при решении исследовательских задач геотермии в таких областях экономически нецелесообразно, необходимо применение альтернативных методов оценки таких характеристик. Одним из перспективных методов идентификации локальных геотермических аномалий является метод измерения придонных температур водоемов. Экспериментальное применение метода на озерах острова Большой Соловецкий продемонстрировало наличие аномалий придонной температуры в некоторых глубоких озерах димиктического типа (озера Большое Красное и Щучье) и в то же время невозможность ясного определения природы термических аномалий без дополнительных исследований. То есть однозначного подтверждения геотермической аномалии получить не удалось, но наблюдаемые повышенные придонные температуры свидетельствуют о возможности ее существования.

Следующим шагом оценки геотермальной ситуации на Большом Соловецком острове должно быть проведение замеров температуры придонных слоев воды со льда. Такие измерения позволят исключить или подтвердить ветровую природу летних придонных температурных аномалий. В случае, если весенне-зимние наблюдения на тех же станциях покажут такие же повышенные значения, как и летние, для дальнейшего изучения и использования геотермальной аномалии станет необходимым бурение скважины глубиной до 500 м вблизи озера Большое Красное, где выявлены максимальные значения придонных температур. Если же весенне-зимние придонные температуры будут близки к «классическим» $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, вопрос о возможности использования геотермальных ресурсов на Большом Соловецком острове можно будет считать закрытым с отрицательным результатом.

Авторы благодарят компанию «Нефть-Сервис» и ее генерального директора Михаила Анатольевича Камышева за проявленный интерес к геотермальным исследованиям, а также за финансовую поддержку нового этапа геотермальных исследований на Соловецких островах. Авторы признательны всем сотрудникам ГГМ РАН, принявшим участие в экспедиции на Соловецкие острова, а также старшему научному сотруднику лаборатории гидрофизики Института водных проблем Севера КарНЦ РАН Н. И. Пальшину за консультации в ходе проведения исследований.

Литература

Богуславский Э. И. Освоение тепловой энергии недр [Электронный ресурс]. СПб.: Научное издание технологий, 2020. 435 с. URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/osvoenie-teplovoy-energii-nedr.pdf> (дата обращения: 01.11.2021).

Гашо Е. Г., Каткова Е. Ю., Попов Д. Е. Разработка и проектирование гибридной системы энергоснабжения // Энергосбережение – теория и практика: Труды X Междунар. школы-семинара. Курск, 2020. С. 117–122.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Ред. Б. Х. Глуховской. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.

Гордиенко В. В., Загородняя О. В., Якоби Н. М. Тепловой поток континентов. Киев: Наукова думка, 1982. 184 с.

Кангаш А. И., Марьяндышев П. А. Комплексное исследование среднегодовой производительности парка ветроэнергетических установок на примере Соловецкого архипелага // Альтернативная энергетика и экология. 2019. № 22-27. С. 21–29. doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.021-029

Методические и экспериментальные основы геотермии / Отв. ред. П. Н. Кропоткин, Я. Б. Смирнов. М.: Наука, 1983. 218 с.

Никитин Д. С., Хуторской М. Д., Самсонова О. С., Тимонин С. А., Богданов И. О. Оценка термического потенциала подземной гидросферы Соловецкого архипелага (о. Большой Соловецкий) // Мониторинг. Наука и технологии. 2021. № 4. С. 15–25.

Пальшин Н. И., Ефремова Т. В., Потахин М. С. Влияние морфометрических характеристик и географической зональности на термическую стратификацию озер // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 2. С. 202.

Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. Ю. Г. Шварцмана, И. Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

Рянжин С. В. Глобальные статистические оценки геотермальных потоков в донных отложениях пресноводных озер // Докл. РАН. 1992. Т. 324, № 3. С. 562–566.

Черкасов С. В., Фархутдинов А. М., Фархутдинов И. М. Геоэкологические аспекты геотермальной энергетики // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021. № 2. С. 17–26. doi: 10.31857/S0869780921020028

Шахвердов В. А., Шахвердова М. В. Исследования температурного режима придонной области оз. Байкал // Геология, геоэкология, эволюционная география / Под ред. Е. М. Нестерова, В. А. Снытко. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2018. С. 87–90.

Шварцман Ю. Г. Тепловое состояние литосферы и новейшие изменения климата на Европейском Севере // Литосфера и гидросфера Европейского Севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С. 130–154.

Москалева В. Н., Марковский Б. А., Колбанцев Л. Р., Орлова М. П., Смолькин В. Ф. Магматизм и металло-

генения рифтогенных систем восточной части Балтийского щита / Под ред. А. Д. Щеглова. СПб.: Недра, 1993. 244 с.

Cherkasov S. V., Churikova T. G., Bekmurzaeva L. R., Gordeichik B. N., Farkhutdinov A. M. The state and prospects for the utilization of geothermal resources in the Russian Federation // Ecology, Environment and Conservation. 2015. Vol. 21, Suppl. iss. P. 67–77.

Cherkasov S., Farkhutdinov I., Nikitin D. Thermograms of lakes of Bolshoy Solovetsky Island. 2021. Mendeley Data. doi: 10.17632/rb6b2j6b5g.1

Renewable energy in Europe, 2018. Recent growth and knock-on effects. European Environmental Agency.

Zdrovennova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdrovennov R., Terzhevik A. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes // Water. 2021. Vol. 13(17). Art. 2435. doi: 10.3390/w13172435

References

Boguslavsky E. I. Development of thermal energy of the subsurface. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2020. 435 p. URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/osvoenie-teplovoy-energii-nedr.pdf> (accessed: 01.11.2021). (In Russ.)

Cherkasov S., Farkhutdinov I., Nikitin D. Thermograms of lakes of Bolshoy Solovetsky Island. 2021. Mendeley Data. doi: 10.17632/rb6b2j6b5g.1

Cherkasov S. V., Farkhutdinov A. M., Farkhutdinov I. M. Geoecological aspects of geothermal energy. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2021;2:17–26. (In Russ.)

Cherkasov S. V., Churikova T. G., Bekmurzaeva L. R., Gordeichik B. N., Farkhutdinov A. M. The state and prospects for the utilization of geothermal resources in the Russian Federation. *Ecology, Environment and Conservation*. 2015;21:67–77.

Gasho E. G., Katkova E. Yu., Popov D. E. Development and design of a hybrid power supply system. *Energoberezhenie – teoriya i praktika: Trudy X Mezhdunar. shkoly-seminara = Energy saving – theory and practice: Proceed. X int. school – seminar*. Kursk; 2020. P. 117–122. (In Russ.)

Glukhovskoi B. Kh. (ed.). Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 2. The White Sea. Iss. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 240 p. (In Russ.)

Gordienko V. V., Zagorodnaya O. V., Yakobi N. M. Heat flow of continents. Kiev: Naukova dumka; 1982. 184 p. (In Russ.)

Kangash A. I., Maryandyshv P. A. A comprehensive study of the average annual productivity of the wind power plant park on the example of the Solovetsky Archipelago. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2019;22-27:21–29. doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.021-029 (In Russ.)

Kropotkin P. N., Smirnov Ya. B. (eds.). Methodological and experimental foundations of geothermy. Moscow: Nauka; 1983. 218 p. (In Russ.)

Moskaleva V. N., Markovskii B. A., Kolbantsev L. R., Orlova M. P., Smol'kin V. F. Magmatism and metallogeny of rift systems of the eastern part of the Baltic Shield. St. Petersburg: Nedra; 1993. 244 p. (In Russ.)

Nikitin D. S., Khutorskoi M. D., Samsonova O. S., Timonin S. A., Bogdanov I. O. Assessment of the thermal potential of the underground hydrosphere of the Solovetsky Archipelago (Bolshoy Solovetsky Island). *Monitoring. Science and Technologies*. 2021;4:15–25. (In Russ.)

Pal'shin N. I., Efremova T. V., Potakhin M. S. Impact of morphometric characteristics and geographical zonality on thermal stratification of lakes. *Water Resources*. 2008;35(2):202. (In Russ.)

Renewable energy in Europe, 2018. Recent growth and knock-on effects. European Environmental Agency.

Ryanzhin S. V. Global statistical assessment of geothermal flows in bottom sediments of freshwater lakes. *Proceedings of the Academy of Sciences*. 1992;324(3):562–566. (In Russ.)

Shakhverdov V. A., Shakhverdova M. V. Studies of the temperature regime of the near-bottom area of Lake Baikal. *Geologiya, geoekologiya, evolyutsionnaya geografiya = Geology, geoecology, and evolutionary geography*. St. Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena; 2018. P. 87–90. (In Russ.)

Shvartsman Yu. G., Bolotov I. N. (eds.). The natural environment of the Solovetsky Archipelago in a changing climate. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2007. 184 p. (In Russ.)

Shvartsman Yu. G. Thermal state of the lithosphere and the latest climate changes in the European North. *Lithosphere and hydrosphere of the European North of Russia*. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2001:130–154. (In Russ.)

Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovenov R., Terzhevik A. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: Effect of changes in light, thermal and ice regimes. *Water*. 2021;13(17):2435. doi: 10.3390/w13172435

Поступила в редакцию / received: 15.11.2021; принята к публикации / accepted: 23.05.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Черкасов Сергей Владимирович

канд. геол.-мин. наук, д-р техн. наук, директор

e-mail: s.cherkasov@sgm.ru

Фархутдинов Исхак Мансурович

канд. геол.-мин. наук, доцент, заместитель директора по науке

e-mail: i.farkhutdinov@sgm.ru

CONTRIBUTORS:

Cherkasov, Sergey

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Dr. Sci. (Tech.), Director

Farkhutdinov, Iskhak

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor,
Deputy Director for Science

УДК 556.12:556.51(268.46)

АТМОСФЕРНЫЕ ОСАДКИ НА ТЕРРИТОРИИ ВОДОСБОРА БЕЛОГО МОРЯ

Л. Е. Назарова

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030)*

В условиях потепления климата оценки изменения режима выпадения атмосферных осадков важны не меньше, чем изменений температуры воздуха. В представленной статье на основании данных многолетних наблюдений на метеорологических станциях сети Росгидромета проанализированы изменения в режиме выпадения осадков на территорию водосбора Белого моря. Оценены изменения годовых и месячных сумм осадков, числа дней с осадками разной интенсивности, доли твердых и смешанных осадков, продолжительности периода выпадения твердых осадков, высоты и продолжительности залегания снежного покрова. Показано, что с начала XXI века почти на всей исследуемой территории отмечается рост количества осадков во все месяцы года, увеличилось число дней с сильными осадками (10 мм и более за сутки), изменилось соотношение долей твердых и смешанных осадков в годовой сумме, изменяется режим их выпадения. Также отмечено сокращение числа дней со снежным покровом на 10–20 суток.

Ключевые слова: атмосферные осадки; водосбор; твердые и смешанные осадки; снежный покров

Для цитирования: Назарова Л. Е. Атмосферные осадки на территории водосбора Белого моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 16–25. doi: 10.17076/lim1563

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН) в рамках темы «Комплексные исследования Белого моря и водосбора в интересах развития Арктической зоны РФ».

L. E. Nazarova. PRECIPITATION OVER THE WHITE SEA CATCHMENT AREA

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

In the regional climate warming context, estimating changes in precipitation patterns is as important as estimation of changes in air temperature. This paper analyzes changes in precipitation over the White Sea catchment area based on long-term data from Roshydromet meteorological stations. Changes in annual and monthly precipitation, a number of days with precipitation of varying intensity, contributions of solid and mixed precipitation, duration of the solid precipitation period, and depth and duration of the snow cover were estimated. It is demonstrated that starting from the beginning of the 21st century almost all of the area has seen a rise in precipitation throughout the year,

an increase in the number of days with heavy precipitation (10 mm and more per day), a change in the ratio of solid and mixed fractions in total annual precipitation, and an alteration of their regime. Also, the duration of the snow cover has decreased.

Keywords: precipitation; catchment area; solid and mixed precipitation; snow cover

For citation: Nazarova L. E. Precipitation over the White Sea catchment area. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 16–25. doi: 10.17076/lim1563

Funding. The study was financed from the Russian federal budget through government assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS) within the topic “Integrated research of the White Sea and its catchment for promoting the development of the Russian Arctic zone.

Введение

Один из важнейших факторов формирования климатических условий территории – атмосферные осадки. Трудно переоценить значение достаточного количества осадков для увлажнения и питания почв, пополнения запасов пресной воды в водных объектах, для формирования гидрологического режима и баланса как территории в целом, так и отдельных водных объектов и водосборов и т. д. «Изучение атмосферных осадков, определение их количества по территории началось давно, и на каждом этапе обобщение режима осадков проводилось на все более высоком уровне знаний» [Швер, 1984]. Результаты исследований, посвященных атмосферным осадкам, выпадающим на территорию водосбора Белого моря, изложены в литературных источниках [Гидрометеорология..., 1991; Кобышева и др., 2001; Filatov et al., 2005; Белое..., 2007; Васильев, Водовозова, 2010 и др.], опубликованных до 2010 г. Краткие обобщения приведены в статьях [Филатов и др., 2012, 2019; Назарова, 2017 и др.]. В настоящее время в условиях потепления климата изменения количества и интенсивности выпадения атмосферных осадков вызывают особый интерес. Таким образом, основная цель данного исследования – более подробно изучить современное состояние и возможные изменения в режиме выпадения атмосферных осадков на территории водосбора Белого моря.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели использованы данные наблюдений на семи метеорологических станциях (МС) Карелии, пяти, десяти и четырех МС Мурманской, Архангельской и Вологодской областей соответственно, двух МС Ненецкого автономного округа и двух МС Республики Коми сети Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и монито-

рингу окружающей среды за период от начала наблюдений на станциях по 2020 г. включительно. В работе использованы сведения, представленные на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ МЦД), а также информация, опубликованная в научно-прикладных справочниках по климату СССР. Проанализированы временные ряды данных наблюдений за атмосферными осадками и снежным покровом с разрешением год, месяц, сутки, сроки.

По решению Всемирной метеорологической организации (ВМО) для расчета климатических норм используют 30-летние базовые периоды. Единые временные отрезки и используемые методики позволяют получать сопоставимые результаты для различных точек наблюдения. На 16-й сессии ВМО в 2014 году решено, что в качестве базового и стабильного периода остается промежуток 1961–1990 гг. В связи с изменением глобального климата ВМО одобрило использование так называемых оперативных норм, которые обновляются каждые 10 лет. В 2021 году нормы должны быть обновлены, периодом расчета станет 1991–2020 гг. Однако для выявления тенденций изменения климата все новые климатические нормы будут сравнивать с периодом 1961–1990 гг.

В качестве основного для исследования климатических характеристик выбран метод статистического анализа данных многолетних метеорологических наблюдений.

Результаты

Вся территория водосбора Белого моря расположена в зоне избыточного увлажнения. Годовое количество осадков колеблется от 400 мм на севере Ненецкого автономного округа до 500–650 мм в Вологодской области и Карелии и до 700 мм на территории Республики Коми. В горных районах Мурманской

области за год выпадает 900–1300 мм атмосферных осадков [Назарова, 2017].

Увеличение повторяемости циклонов, сформировавшихся над Атлантикой, приводит не только к изменчивости температурного режима территории, но и к росту количества выпадающих атмосферных осадков. «Циклоническая деятельность является необходимым условием влагооборота на континенте, так как именно в циклонах совершается осаждение перенесенной с океана влаги» [Швер, 1984]. Согласно данным Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата на территории Российской Федерации [2014], за период 1936–2010 гг. отмечается увеличение годовых сумм осадков практически на всей территории европейской части России. Выраженный рост годовых сумм осадков со второй половины 1980-х годов отмечен также и в Докладе Федеральной службы по гидро-

метеорологии и мониторингу окружающей среды [Доклад..., 2021]. На водосборе Белого моря средние значения годовых сумм атмосферных осадков за 1991–2020 гг. превышают климатические нормы 1961–1990 гг. на 40–80 мм. Однако по данным наблюдений отдельных метеорологических станций (Канин Нос, Жижгин, Койнас, Тотьма) увеличение средних многолетних годовых значений не отмечается или незначимо (табл. 1). На рис. 1 представлена многолетняя динамика сумм атмосферных осадков по данным наблюдений МС Кандалакша и Вологда. Анализируя приведенные графики, можно сделать следующие выводы. До 1960 г. годовые суммы измеренных осадков были значительно ниже современных, что объясняется недоучетом осадков в этот период из-за существовавшей в то время практики измерений (использование дождемеров, замененных в 1950-е годы на осадкомеры;

Таблица 1. Средние годовые суммы атмосферных осадков

Table 1. Mean annual precipitation

Метеорологическая станция Meteorological station	Период осреднения Averaging period		Метеорологическая станция Meteorological station	Период осреднения Averaging period	
	1961–1990	1991–2020		1961–1990	1991–2020
Каневка Kanevka	465	502	Мезень Mezen	490*	580
Краснощелье Krasnoschel'e	502	551	Койнас Koynas	603	588
Ковдор Kovdor	576	611	Архангельск Arkhangelsk	553	633
Умба Umba	482	556	Онега Onega	588	636
Кандалакша Kandalaksha	520	571	Сура Sura	551	571
Энгозеро Engozero	539	629	Шенкурск Shenkursk	565	569
Калевала Kalevala	539	592	Няндомы Nyandoma	725	778
Кемь-порт Kem-harbour	464	525	Каргополь Kargopol	627	671
Гридино Gridino	411	476	Котлас Kotlas	528	599
Колежма Kolezhma	532	596	Усть-Вымь Ust-Vym	543*	575
Паданы Padany	530	571	Сыктывкар Syktyvkar	543	651
Сегежа Segezha	582	648	Великий Устюг Velikiy Ustyug	520*	579
Канин Нос Kanin-Nos	424	436	Тотьма Tot'ma	620	623
Шойна Shoyna	389	419	Никольск Nicol'sk	598	653
Жижгин Zhyzhgin	371	341	Вологда Vologda	568	568

Примечание. *Рассчитано за период 1966–1990 гг.

Note. *Calculated for 1966–1990.

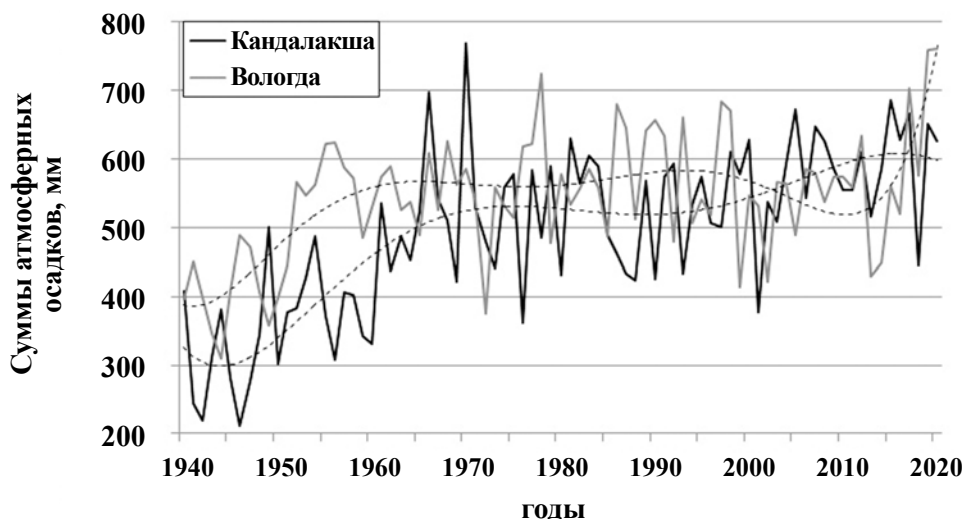


Рис. 1. Годовые суммы атмосферных осадков (мм), МС Кандалакша и Вологда. Пунктирная линия – полиномиальный тренд 6-й степени

Fig. 1. Annual rainfall (mm) based on the data from MS Kandalaksha and Vologda. Dotted line presents a trend approximated by the sextic polinomial

изменение методики введения поправок на смачивание). После 1960 г. число лет, когда осадков было больше нормы, примерно соответствует количеству лет с осадками ниже нормы. В последние 17–20 лет, по данным наблюдений большинства станций (кроме указанных выше), преобладают положительные тенденции изменения годовых сумм атмосферных осадков. Однако, как отмечено в [Доклад..., 2021], «региональные тренды наблюдаются на фоне существенных колебаний с периодом в несколько десятилетий, так что нельзя с уверенностью утверждать наличие тренда, а лишь наличие определенной фазы таких колебаний».

Внутри года количество выпадающих атмосферных осадков неравномерно. Наибольшее количество выпадает с июня по октябрь – до 60 % годовой суммы. Минимальное отмечается в марте–апреле (рис. 2).

Среднее годовое число дней с осадками составляет в основном 190–210, в некоторых районах до 220. За день с осадками считают такой день, когда отмечено выпадение 0,1 мм и более осадков за сутки. Наибольшее число дней с осадками отмечается в холодный период года – с октября по февраль (до 20–25 дней за месяц). В течение последнего десятилетия XX и начала XXI веков годовое число дней с осадками было в пределах или несколько ниже климатической нормы.

Анализ данных о сильных (10 мм и более за сутки) осадках показал, что в течение 1991–2020 гг. годовое число дней с сильными

осадками в большинстве случаев превышало климатическую норму 1961–1990 гг. (рис. 3).

В результате таких колебаний в режиме выпадения атмосферных осадков изменились средние многолетние значения числа дней с сильными осадками на всей территории водосбора Белого моря (табл. 2).

Анализ представленных на сайте ВНИИГМИ МЦД рядов многолетних наблюдений за различными видами осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов (до 2015 года включительно) позволил сделать следующие выводы. Количество твердых осадков за год (снег, крупа, снежные зерна, ледяной дождь, град), по данным наблюдений всех метеостанций, расположенных на водосборе Белого моря, значительно сократилось (рис. 4). Одновременно повсеместно возросла доля смешанных осадков (мокрый снег, дождь со снегом) (рис. 5). Смешанные осадки выпадают при приземной температуре от -2° до $+2^{\circ}$, но чаще всего – от 0° до $+2^{\circ}$, когда снежинки частично подтаивают или когда вместе со снегом выпадает дождь. Увеличение доли смешанных осадков хорошо согласуется с увеличением повторяемости оттепелей в течение холодного периода года.

Поскольку выпадение твердых осадков регулируется температурой воздуха, то даже незначительное повышение средней годовой температуры приводит к существенному уменьшению доли твердых осадков. Так, по данным Ц. А. Швер [1984], для севера ЕЧР

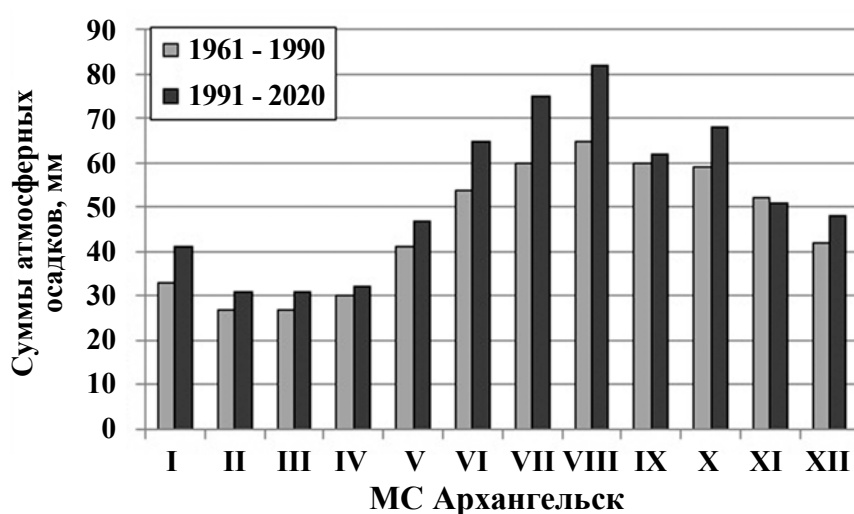
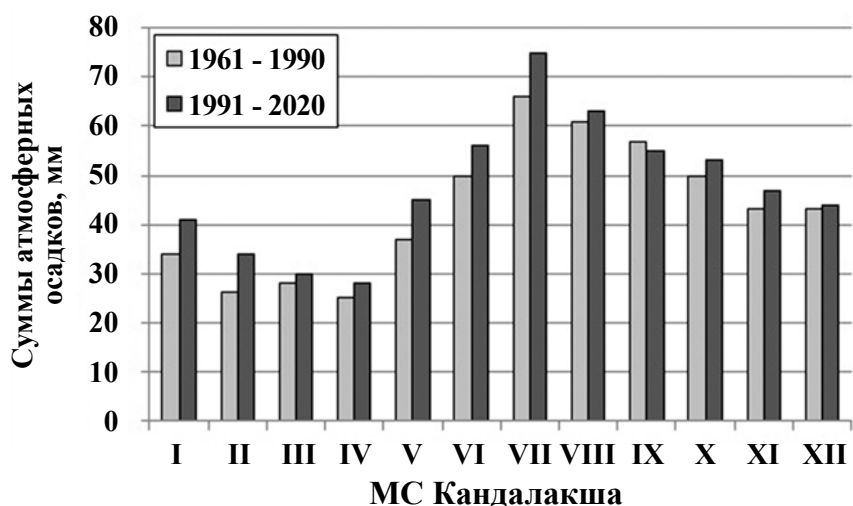


Рис. 2. Средние месячные суммы атмосферных осадков, мм, за 1961–1990 и 1991–2020 гг. по данным наблюдений МС Кандалакша и Архангельск

Fig. 2. Mean monthly precipitation, mm, in 1961–1990 and 1991–2020, based on the data from MS Kandalaksha and Arkhangelsk

и примыкающих арктических районов повышение средней годовой температуры воздуха на 1 °С приводит к снижению доли твердых осадков на 5–6 %.

Кроме изменения количества твердых атмосферных осадков также отмечены изменения во внутригодовом режиме их выпадения. В осенний сезон начало периода с твердыми осадками сместилось на месяц позже. В сентябре осадки в твердой фазе не отмечает ни одна метеостанция. Окончание этого периода весной также отмечается на месяц раньше, для северных районов водосбора Белого моря – в мае, для южных – в апреле. Таким образом, продолжительность периода, в течение которого наблюдается выпадение твердых осадков, сократилась примерно на два месяца

на всей исследуемой территории (рис. 6). При этом следует отметить, что в отдельные зимние месяцы станции регистрируют увеличение сумм твердых осадков. Так, МС Кандалакша фиксирует рост количества твердых осадков в среднем за 1991–2015 гг. для января с 39 до 47 мм, для февраля – с 32 до 38 мм. Увеличение сумм январских твердых осадков отмечают МС Сыктывкар, Архангельск, Сура и др., февральских – Шойна, Архангельск, Калевала, Каневка и др. Отдельные станции наблюдают незначительное увеличение количества твердых осадков в марте. Также следует отметить, что погодные условия каждого конкретного года, безусловно, могут сильно отличаться от средних многолетних значений, приведенных в статье.

Таблица 2. Число дней с осадками различной интенсивности

Table 2. Number of days with precipitation of varying intensity

Станция Station	1961–1990 гг. 1961–1990		1991–2020 гг. 1991–2020	
	$\geq 0,1$ мм $\geq 0,1$ mm	$\geq 10,0$ мм $\geq 10,0$ mm	$\geq 0,1$ мм $\geq 0,1$ mm	$\geq 10,0$ мм $\geq 10,0$ mm
Канин Нос Kanin-Nos	217	3	216	5
Краснощелье Krasnoschel'e	205	8	209	10
Кандалакша Kandalaksha	203	9	197	11
Архангельск Arkhangelsk	205	9	206	12
Онега Onega	196	12	187	14
Калевала Kalevala	198	9	205	11
Кемь-порт Kem-harbour	181	7	181	10
Вологда Vologda	187	11	184	12
Сыктывкар Syktyvkar	197	9	204	13

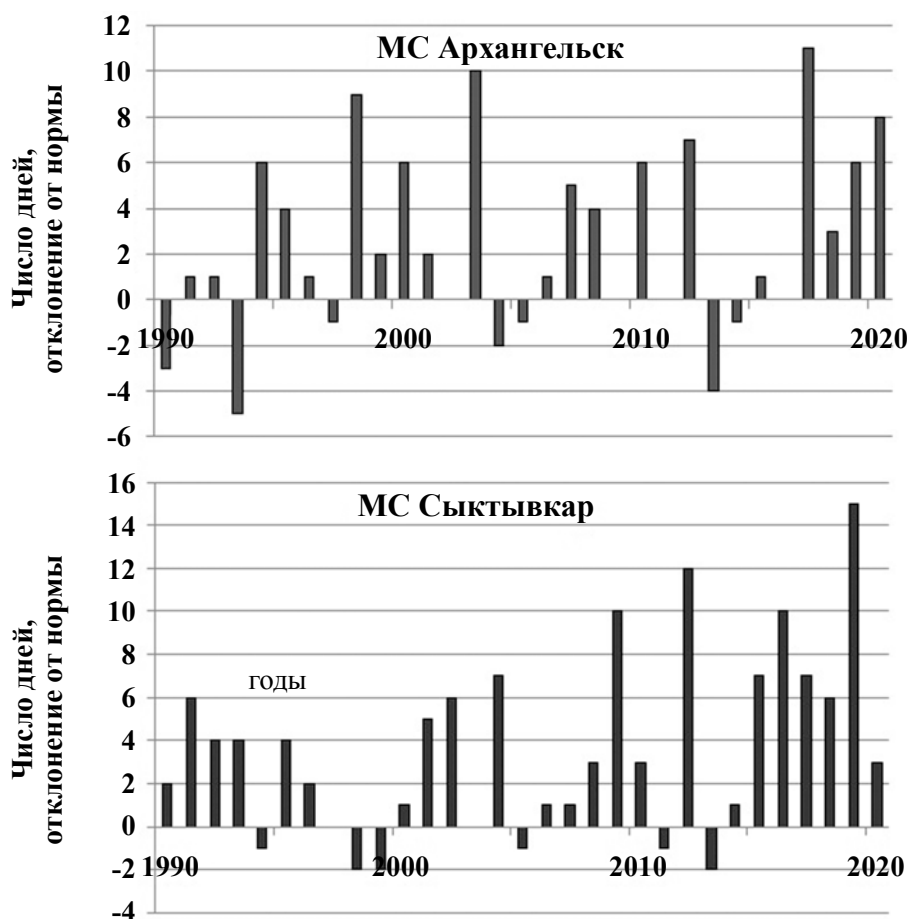


Рис. 3. Отклонения числа дней за год с осадками $\geq 10,0$ мм от климатической нормы (1961–1990), МС Архангельск и МС Сыктывкар

Fig. 3. Deviation of the number of days with precipitation ≥ 10 mm from the climatic norm (1961–1990) based on the data from MS Arkhangelsk and Syktyvkar

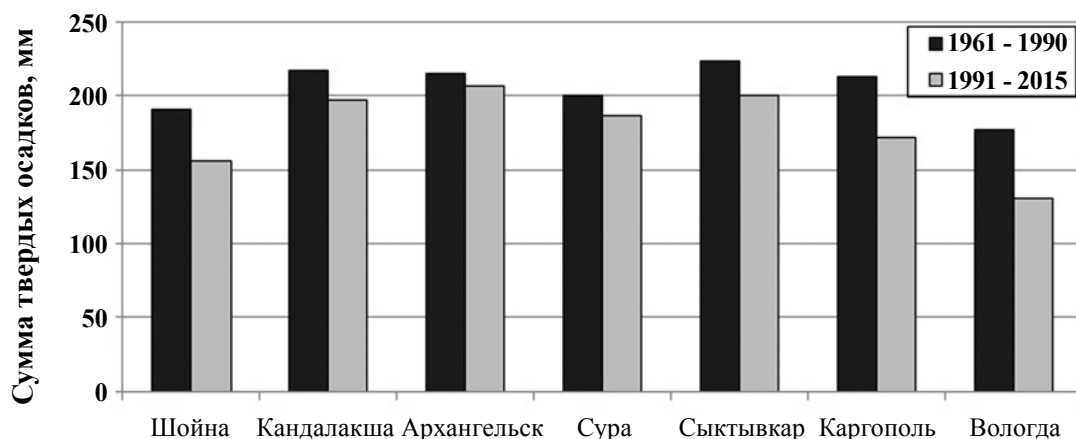


Рис. 4. Средние годовые суммы твердых осадков на территории водосбора Белого моря за 1961–1990 и 1991–2015 гг.

Fig. 4. Mean annual solid precipitation in the White Sea catchment area in 1961–1990 and 1991–2015

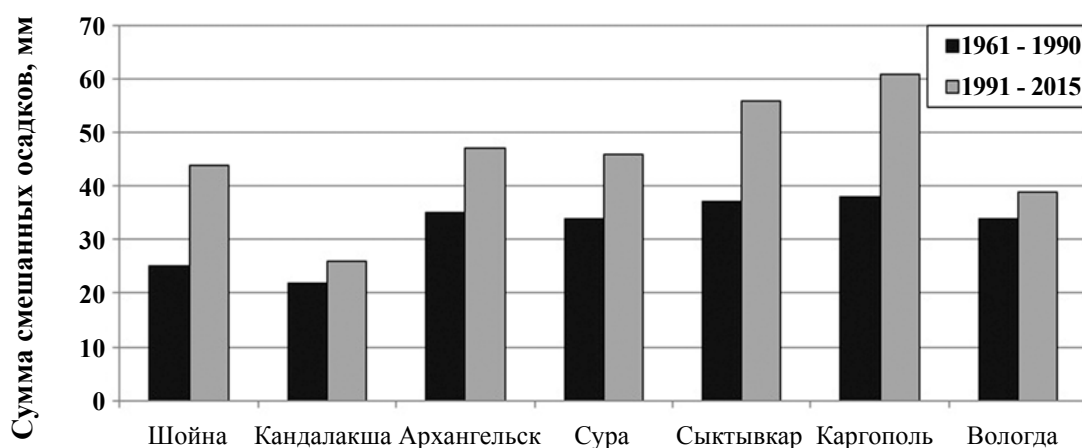


Рис. 5. Средние годовые суммы смешанных осадков на территории водосбора Белого моря за 1961–1990 и 1991–2015 гг.

Fig. 5. Mean annual mixed precipitation in the White Sea catchment area in 1961–1990 and 1991–2015

В целом же наблюдается увеличение общих сумм атмосферных осадков холодного периода года (ноябрь–март) на исследуемой территории (рис. 7).

Твердые атмосферные осадки являются основным источником формирования снежного покрова. Постоянный снежный покров в Мурманской области устанавливается обычно в течение октября, сохраняется на вершинах Хибин и Чунатундры в среднем 220 дней, на остальной территории – 180 дней. В равнинных районах средняя многолетняя высота снежного покрова в конце зимы – 70 см, на Мурманском побережье, где снег сдувается ветром, – 40 см. В Карелии снежный покров держится на юге 160 дней, на севере 190. Средняя толщина его обычно не превышает 50–60 см, но в отдельные годы может дохо-

дить до 110 см. Снежный покров на п-ове Каннин образуется в начале ноября. Разрушение его заканчивается в начале июня. В Архангельской области снежный покров появляется в ноябре и начинает разрушаться в апреле, а на Крайнем Севере может сохраниться до начала июля. Залегаet от 237 дней на севере до 160 дней на юге области. Высота к концу зимы достигает 50–60 см. В Вологодской области устойчивый снежный покров сохраняется в течение 160–170 дней, начало устойчивого снежного покрова относится к началу–середине ноября. Сходит во второй половине апреля. Высота достигает в марте 60–65 см.

Анализ данных о снежном покрове основан на результатах наблюдений по снегомерным рейкам, установленным на постоянных участках. Рассматривались данные о числе дней

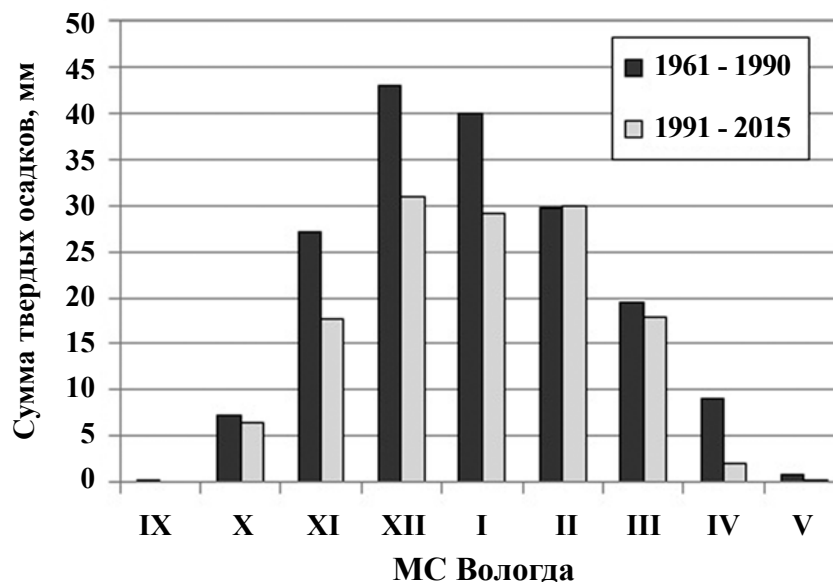
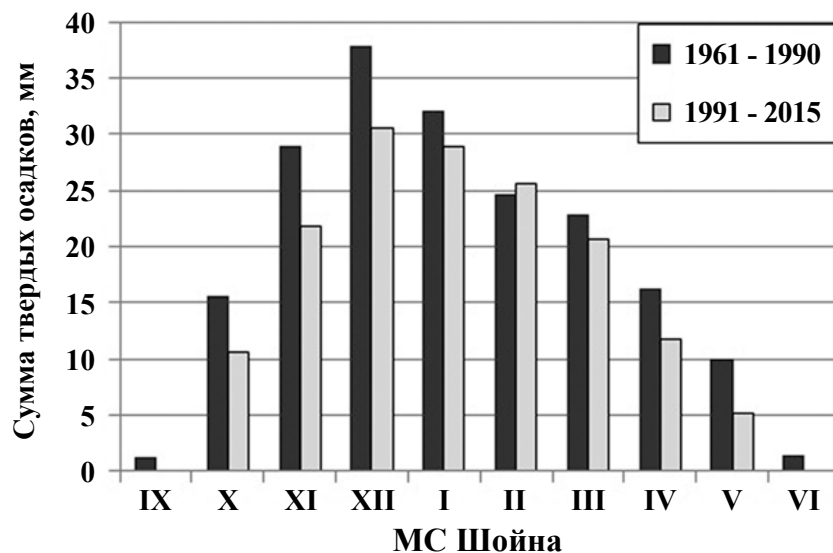


Рис. 6. Средние месячные суммы твердых осадков за 1961–1990 и 1991–2015 гг., мм, МС Шойна и Вологда

Fig. 6. Mean monthly solid precipitation, mm, in 1961–1990 and 1991–2015, based on the data from MS Shoyna and Vologda

в году со снежным покровом и высоте снежного покрова (осредненные за декаду). Днем со снежным покровом считается тот, когда более половины видимой окрестности покрыто снегом, независимо от его высоты. Согласно информации, приведенной в [Доклад..., 2021], на значительной части РФ сохраняется тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова. Для территории водосбора Белого моря сравнение данных наблюдений в течение 1991–2020 гг. с климатической нормой 1961–1990 гг. позволяет сде-

лать вывод, что в настоящее время число дней со снежным покровом ниже средних многолетних значений на 10–20.

Анализ данных о средней декадной высоте снежного покрова, измеренной по постоянным снегомерным рейкам, показывает, что в 1991–2020 гг. значения данной характеристики в среднем за указанный период были в пределах климатической нормы (рис. 8), кроме тех районов, где отмечено увеличение количества твердых осадков в отдельные зимние месяцы, что было указано ранее.

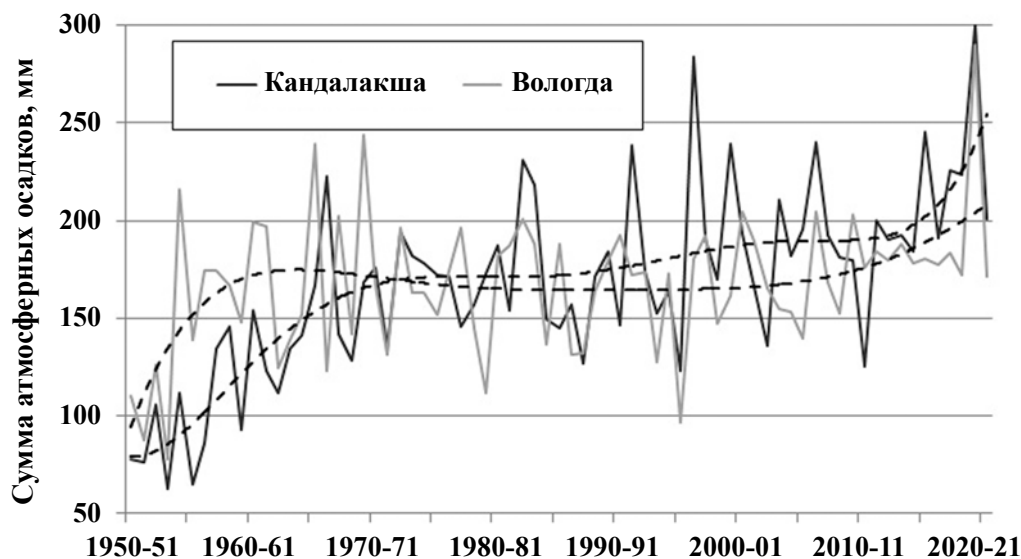


Рис. 7. Суммы атмосферных осадков холодного периода года (ноябрь–март), мм. Пунктирная линия – полиномиальный тренд 6-й степени

Fig. 7. Rainfall for the cold period (November–March), mm. Dotted line presents a trend approximated by the sextic polynomial

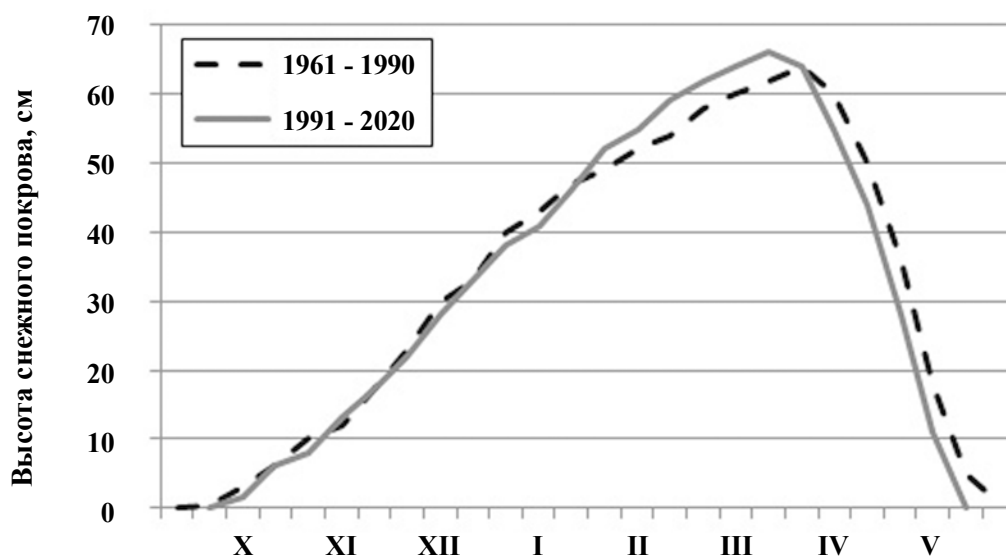


Рис. 8. Средняя декадная высота снежного покрова, см, за периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг., МС Каневка

Fig. 8. Mean decade height of snow cover, cm, in 1961–1990 and 1991–2020, based on the data from MS Kanevka

Заклучение

Анализ изменений количества осадков в районе исследований показывает, что примерно с 2000 года в целом наблюдается рост годовых сумм выпавших атмосферных осадков (в среднем на 40–80 мм). Практически все метеорологические станции, многолетние данные наблюдений которых использованы для

исследования, отмечают увеличение количества осадков во все сезоны года. Также наблюдается усиление интенсивности выпадения осадков при практически неизменном числе дней с осадками ($\geq 0,1$ мм) в течение года. В связи с изменением температурного режима территории, повышением температуры воздуха, примерно на два месяца сократилась продолжительность периода, в течение которого наблюдается

выпадение твердых осадков. Доля твердых осадков в общем годовом количестве значительно уменьшилась, в то же время повсеместно возросла доля смешанных осадков. Высота снежного покрова и продолжительность его залегания несколько ниже климатических норм 1961–1990 гг.

Литература

Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н. Н. Филатова, А. Ю. Терзевича. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 335 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря России». Т. II. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б. Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.

Васильев Л. Ю., Водовозова Т. Е. Климат // Система Белого моря. Том I. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Научный мир, 2010. С. 16–40.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 104 с.

Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Богданова Э. Г., Карпенко В. Н., Ключева М. В., Липовская В. И., Лугина К. М., Разова Е. Н., Семенов Ю. А., Стадник В. В., Хайруллин К. Ш. Климат России. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 655 с.

Назарова Л. Е. Современные климатические условия водосбора Белого моря // Известия РГО. 2017. Т. 149, вып. 5. С. 16–24.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р. Изменение и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика. Экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 80–94.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Дружинин П. В. Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние системы «Белое море – водосбор» // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 9. С. 30–50. doi: 10.17076/lim1117

Швер Ц. А. Атмосферные осадки на территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 285 с.

White Sea. Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change / Eds. Filatov N. N.,

Pozdnyakov D. V. London: Springer-Verlag London Ltd, 2005. 472 p.

References

A report on climate features in the Russian Federation in 2020. Moscow; 2021. 104 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Nazarova L. E., Druzhinin P. V. Influence of climatic and anthropogenic factors on the White Sea – catchment system. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre of RAS*. 2019;9:30–50. (In Russ.)

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R. Change and variability of climate of the European North of Russia and its influence on the water bodies. *Arktika. Ekologiya i ekonomika = The Arctic. Ecology and Economics*. 2012;2(6):80–94. (In Russ.)

Filatov N. N., Pozdnyakov D. V. (eds.). White Sea. Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. London: Springer-Verlag London Ltd; 2005. 472 p.

Filatov N. N., Terzhevik A. Yu. (eds.). The White Sea and its catchment under the influence of climatic and anthropogenic factors. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 335 p. (In Russ.)

Glukhovskiy B. Kh. (ed.). Hydrometeorology and hydrochemistry of seas of the Soviet Union. Project 'Seas of Russia'. Vol. II. The White Sea. Iss. 1. Hydrometeorological conditions. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 240 p. (In Russ.)

Kobysheva N. V., Akent'eva E. M., Bogdanova E. G., Karpenko V. N., Klyueva M. V., Lipovskaya V. I., Lugina K. M., Razova E. N., Semenov Yu. A., Stadnik V. V., Hairullin K. Sh. Climate of Russia. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 2001. 655 p. (In Russ.)

Nazarova L. E. Modern climatic conditions of the White Sea catchment. *Izvestiya RGO = The RGS Herald*. 2017;149(5):16–24. (In Russ.)

Shver C. A. Atmospheric precipitation on the territory of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1984. 285 p. (In Russ.)

The second evaluation report of Roshydromet on climate changes and its consequences over the territory of the Russian Federation. A general summary. Moscow: Rosgidromet; 2014. 60 p. (In Russ.)

Vasil'ev L. Yu., Vodovozova T. E. Climate. *Sistema Belogo morya = The White Sea system*. Vol. I. Environment of the White Sea catchment. Moscow: Nauchnyi mir; 2010. P. 16–40. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 01.04.2022; принята к публикации / accepted: 19.04.2022.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Назарова Лариса Евгеньевна

канд. геогр. наук, директор ИВПС КарНЦ РАН

e-mail: nazarova@nwpi.krc.karelia.ru

CONTRIBUTOR:

Nazarova, Larisa

Cand. Sci. (Geogr.), Director, Northern Water Problems Institute KarRC RAS

УДК 551.465

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛА ЛОРЕНЦА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

С. Г. Демышев, О. А. Дымова*

Морской гидрофизический институт РАН (ул. Капитанская, 2, Севастополь,
Россия, 299011), *olgadym@yahoo.com

На основе данных численного моделирования динамики вод Черного моря рассчитаны компоненты энергетического цикла Лоренца для трех режимов: климатическая циркуляция, бассейновый (2011 г.) и вихревой (2016 г.) режимы. Выявлены следующие общие черты между климатической и реалистичной энергетикой. Среднегодовой переход энергии от среднего движения к вихревому наблюдается для всех режимов циркуляции. Среднегодовая работа силы плавучести увеличивает среднее течение для всех экспериментов, и это свидетельствует о сохранении наклона изопикнических поверхностей таким, что реализуется условие преобразования доступной потенциальной энергии в кинетическую. Качественное отличие состоит в том, что преобразование вихревой кинетической энергии в доступную потенциальную энергию наблюдается только для климатической циркуляции. Для бассейновой циркуляции изменчивость вихревой кинетической энергии определяется потоком, формирующимся за счет преобразования кинетической энергии вследствие баротропной неустойчивости среднего течения. Для вихревого режима рост вихревой кинетической энергии обеспечивается преобразованием доступной потенциальной энергии в кинетическую за счет бароклинной неустойчивости. Тип циркуляции, а также качественная и количественная разница в величинах и направлениях преобразования энергии связаны прежде всего с атмосферным воздействием.

Ключевые слова: Черное море; энергетический цикл Лоренца; средняя циркуляция; вихри; баротропная и бароклинная неустойчивость

Для цитирования: Демышев С. Г., Дымова О. А. Анализ энергетического цикла Лоренца для различных режимов циркуляции Черного моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 26–40. doi: 10.17076/lim1621

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы госзадания ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН» № FNNN-2021-0004 («Океанологические процессы»).

S. G. Demyshev, O. A. Dymova*. ANALYSIS OF THE LORENZ ENERGY CYCLE FOR DIFFERENT REGIMES OF THE BLACK SEA CIRCULATION

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences (2 Kapitanskaya St.,
299011 Sevastopol, Russia), *olgadym@yahoo.com

The Lorenz energy cycle components are calculated from numerically simulated data on the Black Sea dynamics for three regimes: climatic circulation, basin-scale (2011), and eddy (2016) circulations. The some common features have been found between climatic and realistic energy. The mean annual conversion of energy from mean motion to eddy motion is observed for all circulation regimes. The annual mean buoyancy work increases the mean current for all experiments, which indicates that the slope of the isopycnal surfaces remains such that the condition for converting the available potential energy into kinetic energy is realized. The qualitative difference is that the conversion of eddy kinetic energy into available potential energy is observed only for climatic circulation. For basin-scale circulation, the variability of the eddy kinetic energy is determined by the flux formed by the transformation of kinetic energy due to the barotropic instability of the mean current. For the eddy regime, the growth in the eddy kinetic energy is a result of the available potential energy conversion into kinetic energy due to baroclinic instability. The circulation regime, as well as the qualitative and quantitative difference in the magnitudes and directions of energy conversion, are primarily associated with atmospheric forcing.

Keywords: Black Sea; Lorenz energy cycle; mean circulation; eddy; barotropic and baroclinic instability

For citation: Demyshev S. G., Dymova O. A. Analysis of the Lorenz energy cycle for different regimes of the Black Sea circulation. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 26–40. doi: 10.17076/lim1621

Funding. The study was carried out under state assignment to the Marine Hydrophysical Institute RAS within topic # FNNN-2021-0004 (“Oceanology processes”).

Введение

Баротропная и бароклинная неустойчивость является одним из основных источников развития вихрей в атмосфере и океане [Гилл, 1986]. Эти процессы сопровождаются преобразованием кинетической (КЭ) и доступной потенциальной энергии (ДПЭ) между средним по времени и вихревым движением. В соответствии с известными работами [Lorenz, 1955; Holland, 1975; Robinson et al., 1977] КЭ и ДПЭ средней по времени циркуляции обозначим как среднюю кинетическую энергию и среднюю доступную потенциальную энергию, а КЭ и ДПЭ вихревой циркуляции – как вихревую кинетическую энергию и вихревую доступную потенциальную энергию. Взаимодействие между этими четырьмя формами энергии определяет энергетический цикл океана, известный как энергетический цикл Лоренца [Lorenz, 1955].

Анализ энергетического цикла Лоренца для Мирового океана по данным реанализа выполнен в работе [von Storch et al., 2012], где представлены среднегодовые оценки величин энергетических составляющих и основные различия между циклами океана и атмосферы. Методика оценки энергии и механизмов ее преобразования, предложенная Лоренцем, широко используется для региональных исследований циркуляции. Например, район Куроисио рассмотрен в [Yang, Liang, 2018], вихревая изменчивость в

Красном море изучена в [Zhan et al., 2016], подробный анализ механизмов формирования мезомасштабных вихрей в Охотском море представлен в [Stepanov, 2018].

Черное море представляет собой уникальный полузамкнутый бассейн с узким шельфом (исключая северо-западную часть) и крутым континентальным склоном (рис. 1), где рельеф дна и атмосферные условия во многом определяют основные черты термохалинной структуры и динамики [Stanev, 1990; Oguz et al., 1995; Иванов, Белокопытов, 2011].

Первые оценки запаса КЭ и ДПЭ черноморских вихрей на основе натуральных наблюдений даны в [Блатов и др., 1984]. Энергетические характеристики Черного моря, рассчитанные с учетом влияния ветра, потоков тепла и соли, впервые были оценены в [Stanev, 1990], где показана их связь с вертикальной термохалинной структурой. Вывод конечно-разностных уравнений бюджета КЭ и ДПЭ как точное следствие формулировки численной модели был представлен в [Демышев, 2004]. На его основе проанализирован вклад компонентов бюджета КЭ и ДПЭ в энергию климатической циркуляции Черного моря. Оценки кинетической энергии вихрей и течений в Черном море проводились по данным натуральных наблюдений в [Meppa, Poulain, 2014; Kubryakov et al., 2016]. Исследование годовой и междекадной изменчивости ДПЭ по натуральным данным за 1910–1998 гг.

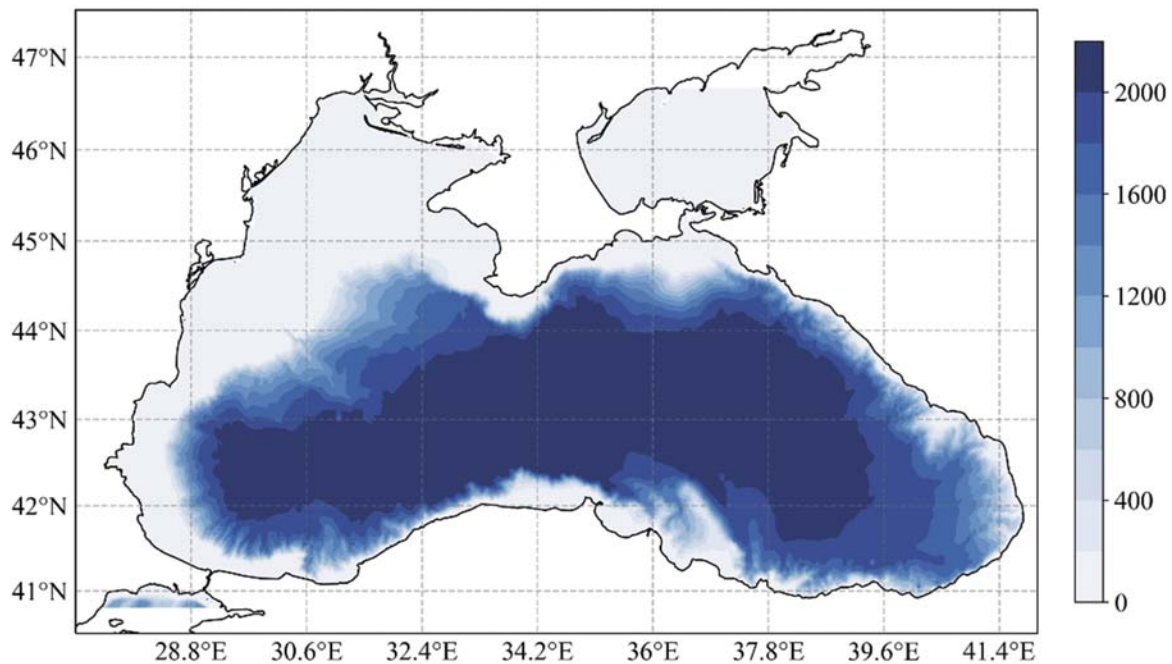


Рис. 1. Батиметрия Черного моря (м)

Fig. 1. The Black Sea bathymetry (m)

представлено в [Суворов, Шокурова, 2004]. Последние исследования свидетельствуют об изменении динамического режима циркуляции Черного моря, появлении многолетних положительных трендов температуры холодного промежуточного слоя [Stanev et al., 2019] и уровня моря [Avsar et al., 2018]. Согласно [Miladinova et al., 2017], циркуляция Черного моря после 1995 г. характеризуется «усилением основного циклонического движения и усилением мезомасштабного антициклонического движения в периоды ослабления Основного черноморского течения». В связи с вышеизложенным понимание современной динамики Черного моря, обусловленной реальным воздействием, может быть дополнено анализом энергетики циркуляции в сравнении с климатическими показателями. Итак, основной целью данной работы является оценка физических механизмов формирования и эволюции особенностей динамики Черного моря на основе численного анализа бюджета энергии по методологии Лоренца [Lorenz, 1955] для различных режимов циркуляции. Компоненты энергетического цикла рассчитаны на основе результатов численного моделирования циркуляции. Анализируются среднегодовые интегральные энергетические характеристики и скорости преобразования энергии, обусловленные генерацией, диссипацией, диффузией и процессами баротропной и бароклинной неустойчивости.

Материалы и методы

Численные эксперименты проведены с использованием вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря, разработанной в Морском гидрофизическом институте (МГИ) РАН [Демышев, 2012]. Модель МГИ построена на основе уравнений Навье – Стокса в приближении Буссинеска и гидростатики. Вертикальное турбулентное перемешивание параметризовано с помощью теории турбулентного замыкания Меллора – Ямады. В качестве граничных условий на свободной поверхности ежесуточно задаются пространственные распределения вектора касательного напряжения трения ветра, потока тепла (включающего длинноволновую радиацию, явное и скрытое тепло) и потока коротковолновой радиации, разница между осадками и испарением. На дне заданы условие прилипания и отсутствие потоков тепла и соли. Для твердых боковых участков границы задаются условия скольжения, для жидких – условия Дирихле: температура в устьях рек соответствует среднемесячным климатологическим данным, соленость равна 7 ‰, скорость рассчитана из среднемесячных климатологических расходов. Характеристики верхнебосфорского течения равны черноморским показателям, температура и соленость в нижнебосфорском течении – характеристикам вод Мраморного моря. Закон сохранения массы

в бассейне обеспечивается через задание скорости нижнебосфорского течения, рассчитанной в предположении равенства нулю суммарного за год расхода воды (сумма расходов рек, проливов и разницы между осадками и испарением). В начальный момент времени задаются уровень моря, температура, соленость и скорости течений. Полная дифференциальная постановка задачи, особенности численной реализации, параметры модели и предустановленные коэффициенты подробно представлены в [Демышев, 2012; Demyshev, Dumova, 2018]. Для данного исследования мы выбрали три временных интервала, когда среднегодовая циркуляция соответствовала квазистационарным режимам, характерным для Черного моря [Stanev, Staneva, 2000]: климатический год, 2011 и 2016 гг.

Эксперимент 1 выполнен с учетом климатологического среднемесячного атмосферного воздействия: полный поток тепла задан в соответствии с результатами работы [Ефимов, Тимофеев, 1990], данные о напряжении ветра, испарении и осадках соответствуют климатологическому форсингу, описанному в [Staneva, Stanev, 1998]. Отметим, что потоки тепла скорректированы таким образом, чтобы суммарный за год полный поток тепла был равен нулю [Ефимов, Тимофеев, 1990], при этом климатический форсинг отражает сезонную изменчивость погодных условий. Начальное поле для эксперимента 1 построено по результатам эксперимента с усвоением климатологических профилей температуры и солености [Демышев и др., 2009].

Атмосферное воздействие в экспериментах 2 и 3 задается реалистичными 6-часовыми данными модели SKIRON [Kallos et al., 1997] с пространственным разрешением $0,1^\circ$ за 2011 и 2016 гг. соответственно. Скорость приводного ветра пересчитывается в касательные напряжения по аэродинамической формуле. В отличие от эксперимента 1 в уравнении переноса тепла отдельно учитывается поток коротковолнового излучения и усваивается температура поверхности моря. Сравнение температурных продуктов нескольких систем прогноза с натурными данными [Mizyuk et al., 2018] показало, что модель МГИ дает ошибки в приповерхностном слое, но демонстрирует наилучшие результаты в слоях 30–100 и 100–300 м. Поэтому в экспериментах с реалистичным форсингом ассимилировалась температура поверхности моря, чтобы уменьшить погрешность модельной температуры в верхнем слое. Гидрофизический реанализ Черного моря CMEMS BS-Circulents [Lima et al., 2020] использован для подготовки начальных полей в экспериментах 2 и 3.

Все эксперименты начинаются с 1 января соответствующего года и выполняются с идентичными параметрами модели МГИ для одного модельного года. Все входные данные линейно интерполируются на каждый шаг по времени. Выходными данными являются ежесуточные поля уровня моря, температуры, солености и скорости течений на регулярной сетке $(1/48)^\circ$ долготы $\times (1/66)^\circ$ широты $\times 27$ z-горизонтов. Валидация результатов моделирования для 2011 и 2016 гг. выполнена по данным альтиметрии, буев-профиломеров АРГО, по спутниковым изображениям температуры поверхности моря и концентрации хлорофилла [Demyshev, Dumova, 2022]. Полученные данные демонстрируют высокую степень соответствия модельных и реальных гидрофизических полей, что подтверждает репрезентативность энергетического анализа.

Модельные среднегодовые скорости течений соответствуют квазистационарным состояниям циркуляции Черного моря, описанным в [Stanev, Staneva, 2000]. Первый режим – бассейновая циркуляция – характеризуется устойчивым циклоническим круговоротом, охватывающим глубоководную часть бассейна (Основное черноморское течение, ОЧТ); второй – вихревая циркуляция – характеризуется преобладанием в поле скорости мезомасштабных вихревых структур разного знака. Формирование типа циркуляции связано с ветровым воздействием, а трансформация между режимами является результатом бароклинной неустойчивости [Stanev, Staneva, 2000]. Карты среднегодовых поверхностных скоростей и гистограммы повторяемости ветра представлены на рис. 2.

Как видно, данные эксперимента 1 соответствуют бассейновой циркуляции: ОЧТ представляет собой ярко выраженный поток со средней скоростью около 30 см/с (рис. 2, а), при этом над поверхностью моря преобладает северо-восточный ветер (рис. 2, г), что определяет положительную вертикальную составляющую завихренности ветрового напряжения [Блатов и др., 1984]. В 2011 г. структура циркуляции качественно близка к климатической, но скорость ОЧТ ниже (рис. 2, б). Ветровое напряжение SKIRON 2011 г. выше климатологического, но повторяемость северо-восточного ветра в 2 раза меньше (рис. 2, д). 2016 г. кардинально отличается от других временных интервалов. В поле скорости преобладают вихри, а ОЧТ наблюдается только в северной части моря (рис. 2, в). Вероятно, формирование вихревой циркуляции связано со структурой поля ветра в 2016 г. Видно, что по сравнению с 2011 г. значения ветрового напряжения изменились мало,

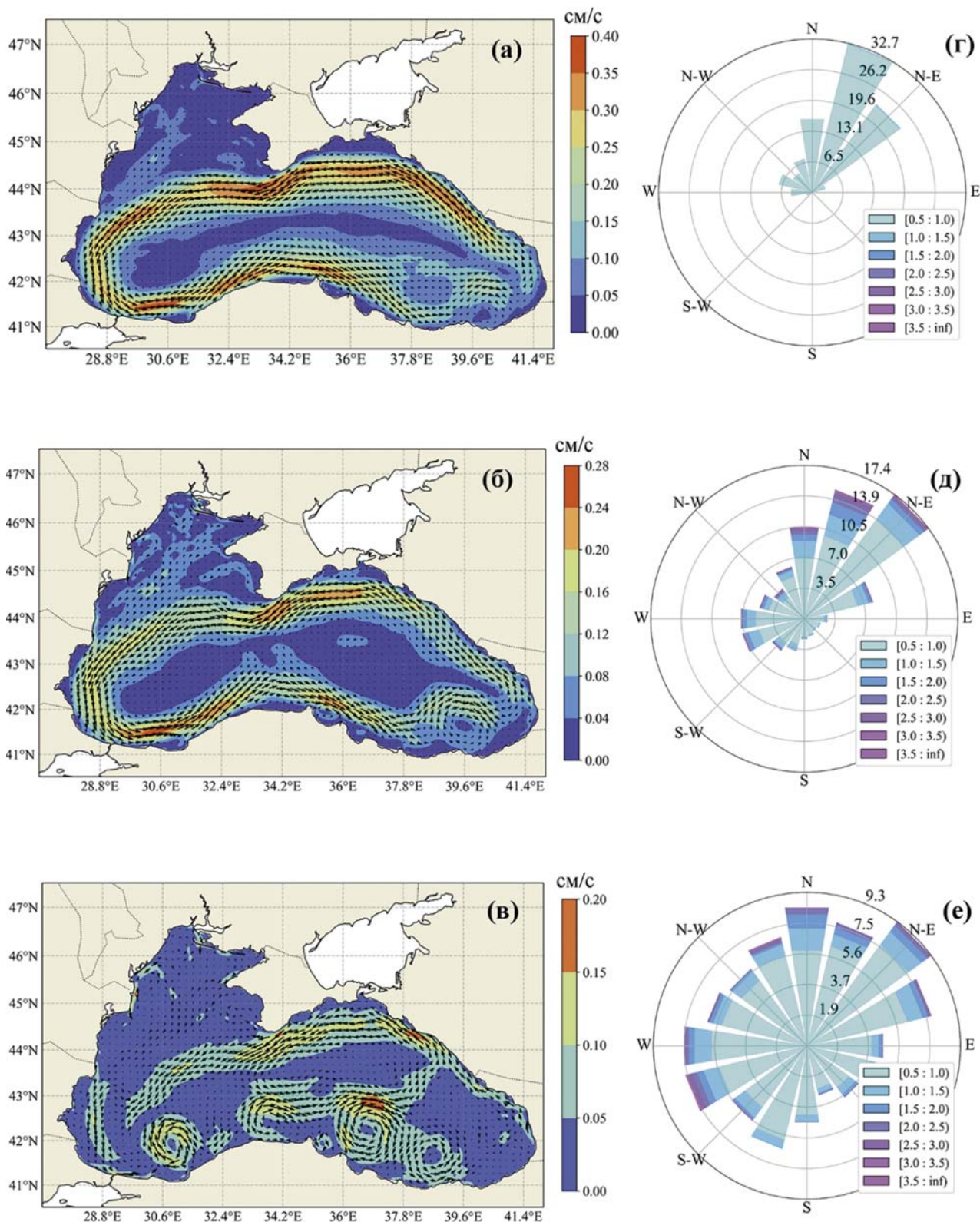


Рис. 2. Среднегодовая скорость течений на горизонте 2,5 м: (а) – эксперимент 1; (б) – эксперимент 2; (в) – эксперимент 3. Среднегодовая повторяемость направлений (цифры, %) и величины напряжения трения ветра (цвет, 10^{-5} Н/см^2): (г) – климатологические данные; (д) – данные SKIRON 2011; (е) – данные SKIRON 2016
 Fig. 2. Annual mean currents velocity on 2.5 m horizon: (a) – experiment 1; (б) – experiment 2; (в) – experiment 3. Annual mean frequency of the wind directions occurrence (digits, %): and wind stress values (color, $10^{-5} \text{ N cm}^{-2}$): (г) – climatological data; (д) – SKIRON 2011; (е) – SKIRON 2016

тогда как направления ветра значительно варьируют (рис. 2, е).

Для анализа энергетических характеристик в Черном море рассмотрены средние за год и флуктуации (суточные отклонения от среднегодовых) полей плотности и скорости для трех периодов (климатический год, 2011 и 2016 гг.). Компоненты цикла Лоренца рассчитываются по формулам

$$Km = \frac{1}{2} \int_V \rho_0 (\bar{u}^2 + \bar{v}^2) dV, Ke = \frac{1}{2} \int_V \rho_0 (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) dV,$$

$$Pm = -\frac{1}{2} \int_V \frac{g}{n_0(z)} \overline{\rho'^2} dV, Pe = -\frac{1}{2} \int_V \frac{g}{n_0(z)} \overline{\rho'^* \rho'^2} dV, \quad (1)$$

$$n_0(z) = \frac{d(\bar{\rho})}{dz}, \rho^* = \rho - \rho_{ref}(z), \rho_{ref}(z) = \langle \bar{\rho} \rangle,$$

где Km – КЭ среднего течения; Ke – вихревая КЭ; Pm – средняя ДПЭ; Pe – вихревая ДПЭ; $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$; ρ – локальная плотность; u и v – зональная и меридиональная скорости; g – ускорение свободного падения; $\rho_{ref}(z)$ – эталонная плотность, зависящая только от вертикальной координаты, рассчитанная как средняя по пло-

$$C(Ke, Km) = - \int_V \rho_0 (\overline{u' \mathbf{u}' \cdot \nabla \bar{u}} + \overline{v' \mathbf{u}' \cdot \nabla \bar{v}}) dV, \quad C(Pe, Pm) = - \int_V \frac{g}{n_0} \overline{\rho'^* \mathbf{u}'_h \cdot \nabla_h \bar{\rho}^*} dV, \quad (2)$$

$$C(Pm, Km) = - \int_V g \overline{\rho^* \bar{w}} dV, \quad C(Pe, Ke) = - \int_V g \overline{\rho'^* \bar{w}'} dV,$$

где \mathbf{u} – вектор скорости; $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_h, w)$; $\nabla = (\nabla_h, \partial/\partial z)$. $C(Ke, Km)$ – поток энергии, обусловленный сдвиговой неустойчивостью среднего течения (баротропная неустойчивость); отрицательное значение указывает на то, что Km трансформируется в Ke . Вертикальный перенос водных масс за счет работы силы плавучести формирует поток $C(Pm, Km)$. Когда плотность морской воды, переносимой вверх, меньше плотности морской воды, переносимой вниз, то $C(Pm, Km)$ положительна. Поток $C(Pe, Pm)$ связан с направлением горизонтального градиента плотности: Pe переходит в Pm , когда поток вихревой плотности $\overline{\rho'^* \mathbf{u}'_h}$ направлен в сторону среднего градиента плотности. Поток $C(Pe, Ke)$ определяет величину бароклинной продукции: он положителен для более легкой морской воды,

щадя слоя локальная плотность; $\int_V dV$ – интеграл по объему. Апостроф обозначает отклонение от среднего, черта над символом – осреднение по времени, угловые скобки – осреднение по площади слоя. В работе интервал осреднения по времени составляет 1 год и выбран из тех соображений, что он позволяет оценить энергетику среднего квазистационарного состояния циркуляции, соответствующего тому или иному режиму. Уменьшение периода осреднения, например до одного месяца или одного сезона, позволит оценить сезонную изменчивость энергетических характеристик и более детально рассмотреть мезомасштабные особенности циркуляции Черного моря. Эта задача составляет тему отдельного исследования, которое мы планируем выполнить в будущем.

Связь между компонентами цикла Лоренца обеспечивается путем преобразования одной формы энергии в другую. Причем это превращение определяется различными физическими процессами. Обозначим скорость конверсии $X \rightarrow Y$ как $C(X, Y)$. Следуя [von Storch et al., 2012], скорости преобразования энергии запишем как

движущейся вверх, и для более плотной морской воды, движущейся вниз. Преобразование энергии $Pm \rightarrow Pe \rightarrow Ke$ осуществляется через механизм бароклинной неустойчивости. Для всех скоростей конверсии C в уравнениях (2) верно, что $C(X, Y) = X \rightarrow Y$ и $-C(X, Y) = Y \rightarrow X$.

Энергетический цикл Лоренца также содержит компоненты, описывающие источники и стоки энергии. Источником КЭ являются средняя во времени и изменяющаяся во времени части работы силы ветра для средней и вихревой энергии соответственно. Источником ДПЭ являются средняя во времени и изменяющаяся во времени части вкладов потоков плавучести, формируемых притоком тепла из атмосферы и разницей между осадками и испарением. Скорости генерации КЭ и ДПЭ (обозначены G) оцениваются как

$$G(Km) = \int_s (\overline{\tau_x u} + \overline{\tau_y v}) ds, \quad G(Ke) = \int_s (\overline{\tau_x' u'} + \overline{\tau_y' v'}) ds, \quad (3)$$

$$G(Pm) = - \int_s \frac{g}{n_0(z)} \overline{\rho^* \bar{Q}} ds, \quad G(Pe) = - \int_s \frac{g}{n_0(z)} \overline{\rho'^* \bar{Q}' } ds,$$

где τ_x, τ_y – компоненты вектора касательного напряжения трения ветра; Q – потоки плавучести на поверхности моря, рассчитанные по [Демышев, 2004]. Скорости диссипации и

диффузии (обозначим как D) рассчитываются как остаточные члены уравнений бюджета КЭ и ДПЭ [von Storch et al., 2012].

Результаты

K_m , K_e , P_m , P_e и скорости их преобразования рассчитаны по формулам (1)–(3) для всех экспериментов. На рис. 3 представлены диаграммы преобразования энергии, иллюстрирующие величину и направление переходов между компонентами энергетического цикла для климатического, 2011 и 2016 годов. Рассмотрим энергетические циклы Лоренца в каждом эксперименте.

В эксперименте 1 (рис. 3, а) приток энергии от ветра к средней и вихревой кинетической энергиям ($G(K_m)$ и $G(K_e)$) практически полностью компенсируется $D(K_m)$ и $D(K_e)$ за счет внутреннего вертикального трения. P_e пополняется тремя компонентами: $G(P_e)$, переходами от P_m и от K_e . При этом увеличение P_m происходит только за счет потоков плавучести через поверхность моря $G(P_m)$. Абсолютное значение $D(P_e)$ сравнимо с суперпозицией слагаемых, увеличивающих P_e . В то же время диффузия $D(P_m)$ на два порядка меньше притока энергии из атмосферы $G(P_m)$. В общем случае диффузия потенциальной энергии складывается из вертикальной и горизонтальной диффузии. Путем точного численного расчета всех компонентов бюджета потенциальной энергии в [Демышев, 2004] показано, что полная вертикальная диффузия положительна для климатической циркуляции, тем самым она увеличивает потенциальную энергию. По-видимому, малое остаточное значение $D(P_m)$ в эксперименте 1 связано с тем, что сток P_m для климатической циркуляции определяется в основном горизонтальной диффузией, которая может быть на 1-2 порядка меньше вертикальной. Передача энергии за счет работы силы плавучести $S(P_m, K_m)$ несколько больше, чем передача от K_m к K_e .

В эксперименте 2 (рис. 3, б) эволюция P_m обеспечивается вкладом энергии за счет поверхностных потоков плавучести $G(P_m)$, ее уменьшением при преобразовании в вихревую энергию $S(P_e, P_m)$ и за счет диффузии $D(P_m)$. P_e определяется преобразованием из P_m в P_e , притоком из $G(P_e)$ и стоком в результате диффузии $D(P_e)$. K_e складывается из притока из атмосферы, переноса из K_m и стока за счет диссипации. K_m формируется балансом трех сил: притока энергии от ветра, передачи кинетической энергии вихревого движения и потерь на трение. Средняя и вихревая работы силы плавучести малы.

Энергетический цикл в эксперименте 3 (рис. 3, в) качественно соответствует второму эксперименту. Отличие состоит в величинах средней и вихревой частей работы силы плавучести, ветровом вкладе в среднюю циркуляцию

и переходе от K_m к K_e . Значения $G(K_m)$ и $S(K_e, K_m)$ являются наименьшими из результатов трех экспериментов. $G(K_m)$, рассчитанная как поверхностный интеграл, очень мала из-за изменчивости направлений ветра (рис. 2, е), средняя циркуляция самая слабая, поэтому количество энергии, переходящее в K_e , также минимально. Скорость преобразования энергии $S(P_e, K_e)$ примерно в 1,8 раза выше, чем $S(P_m, K_m)$, и на порядок выше, чем $S(K_e, K_m)$. Таким образом, среднегодовой перенос энергии от K_m к K_e становится незначительным, при этом приток энергии от ветра, перенос от P_e и диссипация обеспечивают баланс сил в бюджете K_e . Такое же качественное соотношение работы трех сил наблюдается и для K_m .

Сравнительный анализ энергетических диаграмм показывает, что во всех экспериментах наблюдается передача энергии от K_m к K_e и от P_m к P_e . Это свидетельствует о том, что потоки энергии, возникающие в результате преобразования энергии среднего течения в вихревые движения, вносят существенный вклад в баланс вихревой энергии на фоне взаимной компенсации слагаемых, описывающих генерацию и диссипацию вихревой энергии, независимо от режима циркуляции. В то же время величина баротропного переноса существенно зависит от запаса K_m . Как следует из энергетических диаграмм, вклад работы силы ветра $G(K_m)$ превышает потери на диссипацию $D(K_m)$ для бассейнового режима циркуляции (рис. 3, а, б), а поток $S(K_e, K_m)$ на порядок больше, чем та же компонента в вихревом режиме, где $D(K_m)$ больше, чем $G(K_m)$ (рис. 3, в). Количество энергии, которое переходит из P_m в P_e , не связано с режимом циркуляции и определяется термохалинным форсингом. Анализ атмосферных полей (рис. 4, а) показал, что в 2016 г. суммарный тепловой поток и $G(P_m)$ максимальны для трех наборов данных. Однако с точки зрения преобразования энергии это не приводит к увеличению запаса P_m , но вызывает увеличение потока от P_m к P_e для эксперимента 3. Минимальное значение $G(P_m)$, а также минимальный поток $S(P_e, P_m)$ соответствует эксперименту 1.

Работа силы плавучести (описываемая $S(P_m, K_m)$) направлена на увеличение среднего течения для всех экспериментов. Этот результат согласуется с нашими выводами, сделанными в [Demyshev, Dumova, 2018] на основе численного решения уравнений бюджета КЭ и ДПЭ. Положительное значение среднегодовой работы силы плавучести указывает на то, что наклон изопикнических поверхностей сохраняется таким, что реализуется условие для преобразования P_m в K_m .

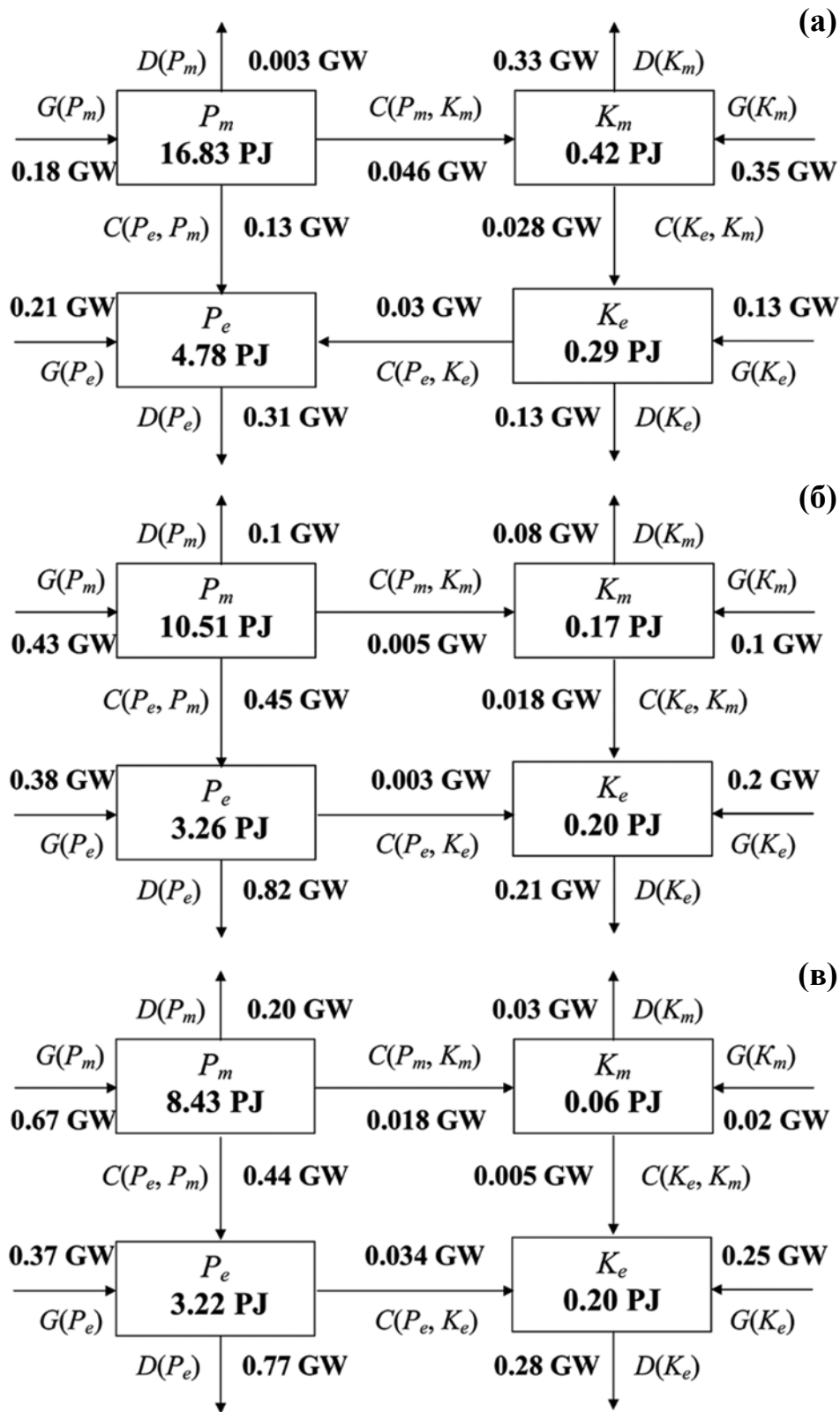


Рис. 3. Энергетический цикл Лоренца в Черном море: (а) – эксперимент 1; (б) – эксперимент 2; (в) – эксперимент 3. Энергия приведена в ПДж (10^{15} Дж), скорости генерации, диссипации и преобразования энергии – в ГВт (10^9 Вт)

Fig. 3. The Lorenz energy cycle in the Black Sea: (a) – experiment 1; (б) – experiment 2; (в) – experiment 3. Energy labeled in petajoules (PJ, 10^{15} J), the rates of generation, dissipation, and conversion labeled in gigawatt (GW, 10^9 W)

Сравнение диаграмм показывает качественное отличие климатического расчета от экспериментов 2 и 3. Оно заключается в обмене энергией между Ke и Pe . Среди прочих потоков увеличение Pe обеспечивается и величиной Ke в климатическом расчете (рис. 3, а). Однако для экспериментов 2 и 3 (рис. 3, б, в) видно, что энергия, получаемая от среднего по времени потока плавучести на поверхности $G(Pm)$, почти полностью переходит в Pe , а затем часть ее передается в Ke , так как вклад $G(Pe)$ компенсируется диффузией. Это можно объяснить следующим образом. В эксперименте 1 вклад генерационных компонентов цикла в величину Pm в несколько раз меньше из-за меньших абсолютных значений климатических атмосферных полей. При этом в среднегодовом временном масштабе черноморские квазистационарные вихри (Севастопольский и Батумский антициклоны) увеличивают наклоны изопикнических поверхностей, тем самым усиливая Pe . С другой стороны, поток $G(Pm)$ при реальном воздействии увеличивается в 2-3 раза по сравнению с климатическим, и в Pe передается примерно в 3 раза больше энергии. Полученные результаты показывают, что бароклинная неустойчивость вносит

существенный вклад в формирование вихревой энергии в реалистичных экспериментах в отличие от климатического.

При анализе результатов экспериментов с учетом реалистичного форсинга следует учитывать различия во внешних данных: 1) ветер более интенсивный, но его направления неравномерны по сравнению с климатом (рис. 2, б, в); 2) потоки тепла и пресной воды характеризуются значительной годовой изменчивостью и более высокими абсолютными значениями (рис. 4); 3) используется ассимиляция температуры поверхности моря. Поток плавучести Q и аномалия плотности ρ^* в верхнем модельном слое содержатся в уравнениях (1), (3) для Pm . Анализ атмосферных данных подтверждает, что более высокие значения атмосферных потоков (красная и синяя кривые на рис. 4), а также ассимиляция температуры приводят к увеличению Q , ρ^* и, следовательно, к более интенсивной генерации Pm в экспериментах 2 и 3. Из рис. 3 (б, в) также видно, что соотношение между вкладами от Pe и от Km в Ke может отличаться в несколько раз. Потоки, изменяющие Ke в климатическом расчете, сопоставимы между собой по величине: разница между ними не превышает 16 %.

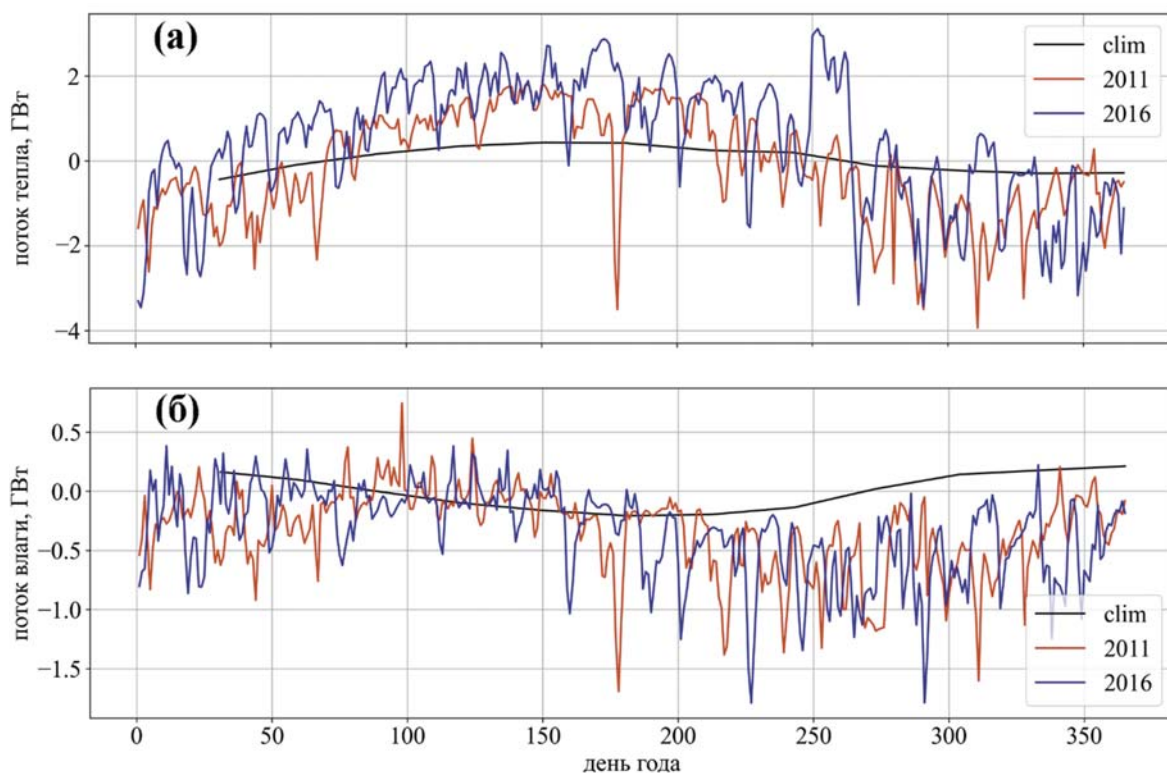


Рис. 4. Временная изменчивость суммарных по поверхности моря потоков из атмосферы по климатологическим данным, по данным модели SKIRON за 2011 и 2016 гг.: (а) – поток тепла; (б) – поток влаги

Fig. 4. Time variability of the total (over sea surface) atmospheric fluxes by the climatological data, SKIRON 2011, and SKIRON 2016: (a) – heat flux; (b) – freshwater flux

Для 2016 г. скорость $C(Рe,Кe)$ на порядок выше, чем в 2011 г., а $C(Кe,Кm)$ более чем в три раза меньше по сравнению с 2011 г. Причина такого распределения значений преобразования энергии в экспериментах 2 и 3 объясняется следующим образом. Величина Km и поток $C(Кe,Кm)$ уменьшаются из-за ослабления ветрового воздействия $G(Кm)$ в 2016 г. Поток $G(Кe)$ полностью компенсируется диссипацией, а $D(Рe)$ уменьшается, и в результате перенос $C(Рe,Кe)$ становится доминирующим фактором изменения $Кe$. При сравнении значений атмосферных потоков в экспериментах 2 и 3 видно, что ослабление средней циркуляции и интенсивный прогрев верхних слоев моря приводят к увеличению бароклинной продукции. Таким образом, основным механизмом изменения $Кe$ в бассейновом режиме циркуляции (климат и 2011 г.) является баротропная неустойчивость, а для вихревой циркуляции (2016 г.) – бароклинная неустойчивость.

Наши количественные оценки КЭ и ДПЭ в Черном море согласуются с данными других авторов. Так, например, в [Суворов, Шокурова, 2004] среднегодовое значение ДПЭ в верхнем 300-метровом слое составляет $13,5 \times 10^{14}$ Дж, что несколько ниже результатов эксперимента 1 и связано с меньшим объемом расчетной области. В [Menna, Poulain, 2014] даны пространственные плотности распределения Km и Ke в верхнем 15-метровом слое со значениями $150\text{--}700 \text{ см}^2/\text{с}^2$ и $100\text{--}250 \text{ см}^2/\text{с}^2$ соответственно; в работе [Kubryakov et al., 2016] приводятся максимальные величины около $300 \text{ см}^2/\text{с}^2$ для среднегодовой плотности Km . Наши пространственные оценки (здесь не приведено) в пересчете на плотность энергии дают максимальные величины до 350 и $170 \text{ см}^2/\text{с}^2$.

Обсуждение

Среднегодовые интегральные энергетические характеристики получены по результатам численного моделирования циркуляции Черного моря за три периода (климатический, 2011 и 2016 гг.). Поля средних скоростей течений свидетельствуют о том, что в климатическом и в 2011 г. реализуется бассейновый режим циркуляции, в 2016 г. – вихревой. Реализация того или иного режима зависит от пространственной изменчивости ветрового воздействия. Для рассматриваемых интервалов времени модельная циркуляция характеризуется бассейновой структурой, когда над морем преобладают северо-восточные ветры независимо от величины ветрового напряжения; вихревой режим циркуляции соответствует условиям, когда направления ветра

существенно меняются в течение года. Этот результат согласуется с литературными данными о том, что именно ветер является определяющим фактором в формировании структуры циркуляции Черного моря [Oguz et al., 1995; Staneva, Stanev, 1998]. В среднем за год передача кинетической и потенциальной энергий от средних к вихревым движениям наблюдается во всех экспериментах, что указывает на существенный вклад этих потоков в бюджет вихревой энергии (в контексте взаимной компенсации потоков генерации и диссипации). Однако величины этих потоков зависят от внешних факторов и режима циркуляции. Так, поток $C(Кe,Кm)$ определяется запасом Km , который напрямую зависит от величины ветрового вклада: получено, что в режиме вихревой циркуляции при минимальном вкладе работы силы ветра поток $C(Кe,Кm)$ также минимален. Передача энергии $C(Рe,Рm)$ соответствует величине $G(Рm)$. Для режима климатической бассейновой циркуляции $G(Рm)$ невелика из-за малых абсолютных значений потоков из атмосферы (рис. 4, черная кривая); поэтому и $C(Рe,Рm)$ является наименьшим.

Для всех экспериментов среднегодовая работа силы плавучести положительна и соответствует переходу из Pm в Km . По численным оценкам, представленным в [Stanev, 1990; Демьшев, 2004] для климатической циркуляции, работа силы плавучести также уменьшает потенциальную энергию. Однако для глобального океана [von Storch et al., 2012] знак потока $C(Pm, Km)$ противоположен нашим результатам. Это различие связано с тем фактом, что в глобальном масштабе всегда присутствует меридиональная опрокидывающая циркуляция, способствующая выравниванию изопикнических поверхностей. В Черном море конвективное перемешивание наблюдается только зимой, в остальную часть года сохраняется двухслойная стратификация вод. Таким образом, наклон изопикнических поверхностей поддерживается таким, что реализуются предпосылки для развития неустойчивости и превращения ДПЭ в КЭ в верхнем 300-метровом слое. Как видно из рис. 5 (а), среднегодовые профили температуры, солёности и плотности для трех экспериментов подтверждают наличие двухслойной стратификации, где в верхнем 300-метровом слое наблюдаются значительные вертикальные градиенты термохалинных характеристик. Сопоставляя рис. 3 и 5 (а), следует отметить связь между температурой и скоростью генерации Pm . Для климатической циркуляции выделяются минимумы температуры верхнего слоя моря и величины $G(Pm)$, при этом существенной разницы между профилями солёности в трех режимах

не наблюдается. Таким образом, сезонный нагрев верхнего слоя моря в значительной степени определяет аномалию плотности, и следовательно, запас Pm . Глубина залегания вод холодного промежуточного слоя (примерно 50–100 м) и основного галоклина (50–250 м) незначительно отличается для трех экспериментов. По результатам моделирования интегральный поток $S(Pm, Km)$ также не связан с режимом циркуляции, а определяется пространственным распределением и интенсивностью зон подъема и опускания вод, т. е. знаком вертикальной скорости. Типичной для Черного моря является куполообразная структура поля плотности с подъемом вод в глубоководной части моря и опусканием по периферии [Иванов, Белокопытов, 2011], что хорошо прослеживается в модельном поле солёности для всех режимов (рис. 5, б).

Обнаружено качественное различие между энергетическими циклами Лоренца, получен-

ными по результатам эксперимента с климатическим и реалистичным воздействием: это направление среднегодового переноса энергии между Ke и Pe . Ke увеличивает Pe для климатической циркуляции, и напротив, энергия Pe преобразуется в Ke для обоих реалистичных экспериментов. Этот результат является следствием учета реалистичного термохалинного воздействия и ассимиляции температуры поверхности моря. В экспериментах 2 и 3 более высокие значения слагаемых $G(Pe)$ и потоков плавучести $S(Pe, Ke)$ в верхнем модельном слое определяются повышенными атмосферными потоками (рис. 4, красная и синяя кривые) и аномалиями плотности (рис. 5, а, зеленая и синяя кривые) и формируют бароклинный транспорт энергии $Pm \rightarrow Pe \rightarrow Ke$. Поэтому, независимо от режима, именно бароклинная неустойчивость дает вклад в генерацию вихревой энергии для реалистичной циркуляции.

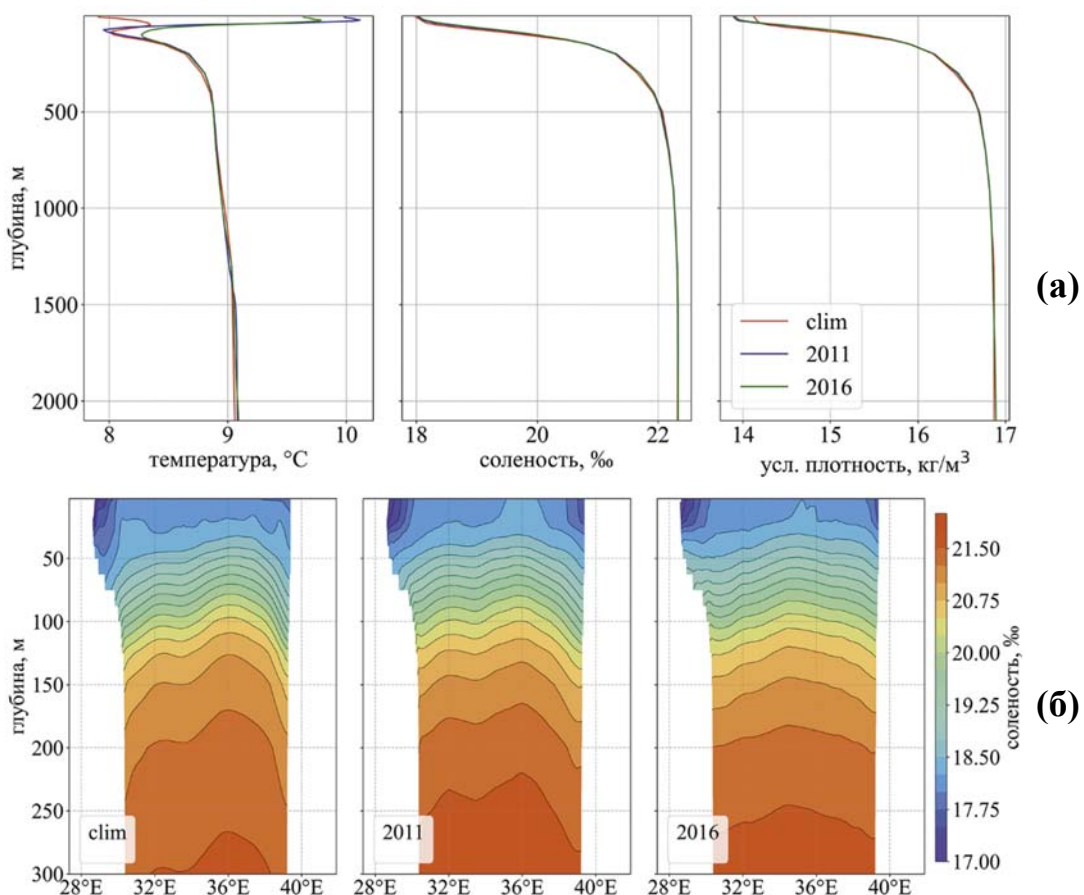


Рис. 5. Пространственное распределение термохалинных характеристик по результатам моделирования: (а) – среднегодовые профили температуры, солёности и условной плотности; (б) – вертикальный разрез среднегодового поля солёности вдоль 43° с.ш.

Fig. 5. Spatial distribution of the thermohaline characteristics by the simulation results: (a) – annual mean profiles of temperature, salinity and relative density; (б) – vertical cross-section of the annual mean salinity field along 43° N

Другими словами, когда вихревая динамика контролируется интенсивным сдвиговым течением, как в режиме климатической циркуляции (рис. 2, а), то в системе нет предпосылок для извлечения доступной потенциальной энергии через механизм бароклинной неустойчивости, хотя запас этой энергии может быть достаточно большим.

Скорости преобразования энергии $C(Re,Ke)$ и $C(Ke,Km)$ могут различаться в несколько раз в зависимости от режима циркуляции. Анализ атмосферного воздействия показал, что потоки пресной воды в 2011 и 2016 гг. близки по величине, но поток тепла был максимален в 2016 г. Кроме того, скорость преобразования энергии между Re и Ke в 2016 г. на порядок выше, чем в 2011 г., но вклад Km примерно в три раза меньше, чем в 2011 г. Следовательно, увеличение теплового потока (рис. 4) и ослабление ветрового воздействия (рис. 2, е) приводит к увеличению бароклинной продукции в режиме вихревой циркуляции. Таким образом, основным механизмом изменения Ke является баротропная неустойчивость для бассейновой циркуляции в 2011 г. и бароклинная неустойчивость для вихревой циркуляции в 2016 г.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что в случае, когда приток энергии от ветра недостаточен для установления бассейнового режима, бароклинная неустойчивость обеспечивает поддержание вихревой циркуляции. Это приводит к развитию мезомасштабных вихрей в центральной глубоководной части моря, сравнимых по размерам и интенсивности с прибрежными антициклонами (такими, например, как Севастопольский и Батумский антициклоны), и увеличению Re за счет их эволюции.

Описанные результаты получены для трех отдельных интервалов. На данном этапе мы не можем прямо ответить на вопрос, что происходит в межгодовом масштабе. Судя по данным многолетней межгодовой изменчивости циркуляции Черного моря [Kubryakov et al., 2016; Miladinova et al., 2017], существуют экстремальные периоды (с минимальными или максимальными скоростями течений) и некоторые промежуточные периоды (когда циркуляция перестраивается в ответ на тренды в изменчивости атмосферных условий или под влиянием внутренних колебаний системы). Время смены гидродинамических режимов, по разным данным, колеблется от 20 месяцев [Stanev, Staneva, 2000] до 3–10 лет [Kubryakov et al., 2016;

Miladinova et al., 2017]. На основании полученных результатов мы полагаем, что бароклинная продукция (поток $Pm \rightarrow Pe$) и преобразование энергии через механизм баротропной неустойчивости (поток $Km \rightarrow Ke$) будут сохранять свое направление из года в год при перестройке от одного режима циркуляции к другому. Средняя и вихревая части работы силы плавучести в Черном море, по-видимому, могут менять знак в межгодовом масштабе. Диаграммы Лоренца на рис. 3 показывают, что поток между Pm и Km может отличаться на порядок, а преобразование энергии между Pe и Ke происходит в обоих направлениях. Эти вопросы являются ключевыми для оценки межгодовой изменчивости циркуляции Черного моря и репрезентативности методики Лоренца на длительном интервале времени. Еще один момент, заслуживающий внимания в контексте анализа энергетики моря, – это расчет скорости диссипации энергии. На представленных диаграммах компоненты D рассчитаны как остаточные члены уравнений бюджета энергии. Однако точный расчет этих величин позволит применить энергетический анализ для таких оценок, как, например, эффективность перемешивания или выделение обратимого и необратимого преобразования энергии. Также представляет интерес исследование влияния сезонной изменчивости атмосферных потоков на пространственное распределение энергетических и термохалинных полей. Уточнить эти неопределенности помогут дальнейшие исследования пространственно-временной изменчивости энергетических и гидрофизических характеристик циркуляции для многолетнего периода и использование точных решений для всех компонент уравнений бюджета кинетической и доступной потенциальной энергии.

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания.

Литература

- Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А., Косарев А. Н., Тужилкин В. С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 240 с.
- Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Т. 2. М.: Мир, 1986. 415 с.
- Демышев С. Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149.
- Демышев С. Г. Энергетика климатической циркуляции Черного моря. Ч. I. Дискретные уравнения скорости изменения кинетической и потенциальной энергий // Метеорология и гидрология. 2004. № 9. С. 65–80.

Демьшев С. Г., Иванов В. А., Маркова Н. В. Анализ климатических полей Черного моря ниже основного пикноклина, полученных на основе усвоения архивных данных по температуре и солености в численной гидродинамической модели // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 1. С. 3–15.

Ефимов В. В., Тимофеев Н. А. Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1990. 236 с.

Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.

Суворов А. М., Шокурова И. Г. Годовая и десятилетняя изменчивость доступной потенциальной энергии в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 2. С. 29–41.

Avsar N. B., Jin S., Kutoglu S. H. Recent sea level changes in the Black Sea from satellite gravity and altimeter measurements // *Int. Arch. Photogramm Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2018. Vol. XLII-3/W4. P. 83–85. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-83-2018

Demyshev S. G., Dymova O. A. Analysis of the annual mean energy cycle of the Black Sea circulation for the climatic, basin-scale and eddy regimes // *Ocean Dynamics*. 2022. Vol. 72, no. 3-4. P. 1335–1352. doi: 10.1007/s10236-018-1200-6

Demyshev S. G., Dymova O. A. Numerical analysis of the Black Sea currents and mesoscale eddies in 2006 and 2011 // *Ocean Dynamics*. 2018. Vol. 68, no. 10. P. 1335–1352. doi: 10.1007/s10236-018-1200-6

Holland W. R. Energetics of baroclinic oceans / Numerical models of ocean circulation. Washington: National Academy Press, 1975. P. 168–177.

Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A., Jovic D., Kakaliagou O., Misirlis N., Boukas L., Mimikou N., Sakellariadis G., Papageorgiou J., Anadranistakis E., Manousakis M. The regional weather forecasting system SKIRON: an overview // Proceedings of the International Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments (Athens, Greece, 15–17 October 1997). Athens, 1997. P. 109–122.

Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V. Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // *J. Marine Syst.* 2016. Vol. 163. P. 80–94. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.06.006

Lima L., Aydogdu A., Escudier R., Masina S., Ciliberti S., Azevedo D., Peneva E., Causio S., Cipollone A., Clementi E., Creti S., Stefanizzi L., Lecci R., Palermo F., Coppini G., Pinardi N., Palazov A. Black Sea Physical Reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) [Data set]. 2020. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). doi: 10.25423/CMCC/BLKSEA_MULTYEAR_PHY_007_004

Lorenz E. N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation // *Tellus*. 1955. Vol. 7, no. 2. P. 157–167.

Menna M., Poulain P.-M. Geostrophic currents and kinetic energies in the Black Sea estimated from merged drifter and satellite altimetry data // *Ocean Sci.* 2014. Vol. 10. P. 155–165. doi: 10.5194/os-10-155-2014

Miladinova S., Stips A., Garcia-Gorrioz E., Macias Moy D. Black Sea thermohaline properties: Long-term

trends and variations // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 5624–5644. doi: 10.1002/2016JC012644

Mizyuk A. I., Puzina O. S., Senderov M. V. Accuracy of the reconstructed temperature in the Black Sea upper layer from nowcasting/forecasting systems // *J. Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 1128, no. 012146. doi: 10.1088/1742-6596/1128/1/012146

Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Aubrey D. Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing // *J. Geophys. Res. Oceans*. 1995. Vol. 100(C4). P. 6845–6864. doi: 10.1029/95JC00022

Robinson A., Harrison D. E., Mintz Y., Semtner A. J. Eddies and the general circulation of an idealized oceanic gyre: a wind and thermally driven primitive equation numerical experiment // *J. Phys. Oceanogr.* 1977. Vol. 7. P. 182–207.

Stanev E. V. On the mechanisms of the Black Sea circulation // *Earth-Science Rev.* 1990. Vol. 28, no. 4. P. 285–319. doi: 10.1016/0012-8252(90)90052-W

Stanev E. V., Staneva J. V. The impact of the baroclinic eddies and basin oscillations on the transitions between different quasi-stable states of the Black Sea circulation // *J. Marine Syst.* 2000. Vol. 24. P. 3–26. doi: 10.1016/S0924-7963(99)00076-7

Stanev E., Peneva E., Chtirkova B. Climate change and regional ocean water mass disappearance: Case of the Black Sea // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2019. Vol. 124, no. 7. P. 4803–4819. doi: 10.1029/2019JC015076

Staneva J. V., Stanev E. V. Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea // *Oceanologica Acta*. 1998. Vol. 21, no. 3. P. 393–417. doi: 10.1016/S0399-1784(98)80026-1

Stepanov D. V. Mesoscale eddies and baroclinic instability over the eastern Sakhalin shelf of the Sea of Okhotsk: a model-based analysis // *Ocean Dynamics*. 2018. Vol. 68. P. 1353–1370. doi: 10.1007/s10236-018-1192-2

von Storch J.-S., Eden C., Fast I., Haak H., Hernandez-Deckers D., Maier-Reimer E., Marotzke J., Stammer D. An estimate of the Lorenz energy cycle for the World Ocean based on the 1/10° STORM/NCEP simulation // *J. Phys. Oceanogr.* 2012. Vol. 42. P. 2185–2205. doi: 10.1175/jpo-d-12-079.1

Yang Y., Liang X. S. On the seasonal eddy variability in the Kuroshio extension // *J. Phys. Oceanogr.* 2018. Vol. 48. P. 1675–1689. doi: 10.1175/JPO-D-18-0058.1

Zhan P., Subramanian A., Yao F., Kartadikara A., Guo D., Hotei I. The eddy kinetic energy budget in the Red Sea // *J. Geophys. Res.* 2016. Vol. 121, no. 7. P. 4732–4747. doi: 10.1002/2015JC011589

References

Avsar N. B., Jin S., Kutoglu S. H. Recent sea level changes in the Black Sea from satellite gravity and altimeter measurements. *Int. Arch. Photogramm Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2018;XLII-3/W4:83–85. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-83-2018

Blatov A. S., Bulgakov N. P., Ivanov V. A., Kosarev A. H., Tujilkin V. S. Variability of hydrophysical fields in the Black Sea. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1984. 240 p. (In Russ.)

- Demyshev S. G. A numerical model of online forecasting Black Sea currents. *Izv. Atmos. Ocean Phys.* 2012;48(1):120–132. doi: 10.1134/S0001433812010021 (In Russ.)
- Demyshev S. G., Dymova O. A. Analysis of the annual mean energy cycle of the Black Sea circulation for the climatic, basin-scale and eddy regimes. *Ocean Dynamics.* 2022;72(3-4):1335–1352. doi: 10.1007/s10236-018-1200-6
- Demyshev S. G., Dymova O. A. Numerical analysis of the Black Sea currents and mesoscale eddies in 2006 and 2011. *Ocean Dynamics.* 2018;68(10):1335–1352. doi: 10.1007/s10236-018-1200-6
- Demyshev S. G. Energy of the Black Sea climatic circulation. 1. Discrete equations of the time rate of change of kinetic and potential energy. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology.* 2004;9:65–80. (In Russ.)
- Demyshev S. G., Ivanov V. A., Markova N. V. Analysis of the Black Sea climatic fields below the main pycnocline obtained on the basis of assimilation of the archival data on temperature and salinity in the numerical hydrodynamic model. *Physical Oceanography.* 2009;19:1–12. doi: 10.1007/s11110-009-9034-x (In Russ.)
- Efimov V. V., Timofeev N. A. Heat-balance study of the Black and Azov Seas. Obninsk: VNIIGMI-MTsD; 1990. 236 p. (In Russ.)
- Gill A. Atmosphere-ocean dynamics. Orlando: Academic Press; 1982. 662 p.
- Holland W. R. Energetics of baroclinic oceans. Numerical models of ocean circulation. Washington: National Academy Press; 1975. P. 168–177.
- Ivanov V. A., Belokopytov V. N. Oceanography of the Black Sea. Sevastopol: ECOSY-Gidrofizika; 2013. 211 p. (In Russ.)
- Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A., Jovic D., Kakaliagou O., Misirlis N., Boukas L., Mimikou N., Sakellariadis G., Papageorgiou J., Anadranistakis E., Manousakis M. The regional weather forecasting system SKIRON: an overview. *Proceedings of the International Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments.* (Athens, Greece, 15–17 October 1997). Athens; 1997. P. 109–122.
- Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Zatsepin A. G., Kremenetskiy V. V. Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem. *J. Marine Syst.* 2016;163:80–94. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.06.006
- Lima L., Aydogdu A., Escudier R., Masina S., Ciliberti S., Azevedo D., Peneva E., Causio S., Cipollone A., Clementi E., Cretí S., Stefanizzi L., Lecci R., Palermo F., Coppini G., Pinardi N., Palazov A. Black Sea Physical Reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) [Data set]. 2020. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). doi: 10.25423/CMCC/BLKSEA_MULTYEAR_PHY_007_004
- Lorenz E. N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus.* 1955;7(2):157–167.
- Menna M., Poulain P.-M. Geostrophic currents and kinetic energies in the Black Sea estimated from merged drifter and satellite altimetry data. *Ocean Sci.* 2014;10:155–165. doi: 10.5194/os-10-155-2014
- Miladinova S., Stips A., Garcia-Gorriz E., Macias Moy D. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2017;122:5624–5644. doi: 10.1002/2016JC012644
- Mizyuk A. I., Puzina O. S., Senderov M. V. Accuracy of the reconstructed temperature in the Black Sea upper layer from nowcasting/forecasting systems. *J. Physics: Conf. Series.* 2018;1128:012146. doi: 10.1088/1742-6596/1128/1/012146
- Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Aubrey D. Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing. *J. Geophys. Res. Oceans.* 1995;100(C4):6845–6864. doi: 10.1029/95JC00022
- Robinson A., Harrison D. E., Mintz Y., Semtner A. J. Eddies and the general circulation of an idealized oceanic gyre: a wind and thermally driven primitive equation numerical experiment. *J. Phys. Oceanogr.* 1977;7:182–207.
- Stanev E. V. On the mechanisms of the Black Sea circulation. *Earth-Science Rev.* 1990;28(4):285–319. doi: 10.1016/0012-8252(90)90052-W
- Stanev E. V., Staneva J. V. The impact of the baroclinic eddies and basin oscillations on the transitions between different quasi-stable states of the Black Sea circulation. *J. Marine Systems.* 2000;24:3–26. doi: 10.1016/S0924-7963(99)00076-7
- Stanev E., Peneva E., Chtirkova B. Climate change and regional ocean water mass disappearance: Case of the Black Sea. *J. Geophys. Res. Oceans.* 2019;124(7):4803–4819. doi: 10.1029/2019JC015076
- Staneva J. V., Stanev E. V. Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea. *Oceanologica Acta.* 1998;21(3):393–417. doi: 10.1016/S0399-1784(98)80026-1
- Stepanov D. V. Mesoscale eddies and baroclinic instability over the eastern Sakhalin shelf of the Sea of Okhotsk: a model-based analysis. *Ocean Dynamics.* 2018;68:1353–1370. doi: 10.1007/s10236-018-1192-2
- Suvorov A. M., Shokurova I. G. Annual and interdecadal variability of the available potential energy in the Black Sea. *Physical Oceanography.* 2004;14:84–95. doi: 10.1023/B:POCE.0000037872.25674.ac (In Russ.)
- Von Storch J.-S., Eden C., Fast I., Haak H., Hernandez-Deckers D., Maier-Reimer E., Marotzke J., Stammer D. An estimate of the Lorenz energy cycle for the World Ocean based on the 1/10° STORM/NCEP simulation. *J. Phys. Oceanogr.* 2012;42:2185–2205. doi: 10.1175/jpo-d-12-079.1
- Yang Y., Liang X. S. On the seasonal eddy variability in the Kuroshio extension. *J. Phys. Oceanogr.* 2018;48:1675–1689. doi: 10.1175/JPO-D-18-0058.1
- Zhan P., Subramanian A., Yao F., Kartadikara A., Guo D., Hotei I. The eddy kinetic energy budget in the Red Sea. *J. Geophys. Res.* 2016;121(7):4732–4747. doi: 10.1002/2015JC011589

Поступила в редакцию / received: 01.06.2022; принята к публикации / accepted: 27.07.2022.
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**Демышев Сергей Германович**

д-р. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник

*e-mail: demyshev@gmail.com***Дымова Ольга Алексеевна**

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

*e-mail: olgadym@yahoo.com***CONTRIBUTORS:****Demyshev, Sergey**

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher

Dymova, Olga

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

УДК 556.013

ВОЗДЕЙСТВИЕ БУДУЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СТОК С ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

С. А. Кондратьев*, **М. В. Шмакова**

*Институт озераедения РАН, Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург,
Россия, 196105), *kondratyev@limno.org.ru*

Выполнена прогностическая оценка возможных изменений стока с водосбора Онежского озера на примере трех крупнейших притоков – рек Шуи, Суны и Водлы в результате предполагаемых изменений климата в XXI веке в соответствии со сценариями выбросов парниковых газов RCP 2.6 и RCP 8.5 – лучшим и худшим с точки зрения воздействия на окружающую среду соответственно. Информация об изменении значений метеозаэлемента, необходимых для расчетов стока, получена на основе климатических моделей MPI-ESM-MR и IPSL-CM5A. Для оценки возможного изменения стока в результате изменений регионального климата использована модель формирования стока на водосборе ILHM. При использовании материалов обеих климатических моделей существенное увеличение температуры воздуха в сценарии RCP 8.5 приводит к возрастанию расчетных значений испарения, которое в большой степени компенсирует увеличение стока реки за счет возрастания осадков. Согласно сценарию RCP 2.6 значимых изменений испарения не происходит. В случае сочетания RCP 2.6 и MPI-ESM-MR отмечается небольшое снижение стока к концу 21 века. Можно предположить, что изменение стока с водосбора Онежского озера будет находиться в промежутке между оценками, сделанными по двум экстремальным сценариям, и не стоит ожидать экстремальных изменений гидрологического режима речных водосборов в рассматриваемом регионе.

Ключевые слова: речной сток; расход воды; климатический сценарий; осадки; температура воздуха; модель

Для цитирования: Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Воздействие будущих климатических изменений на сток с водосбора Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 41–49. doi: 10.17076/lim1581

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 22-17-00193.

S. A. Kondratyev*, M. V. Shmakova. IMPACT OF FUTURE CLIMATE CHANGE ON RUNOFF IN LAKE ONEGO CATCHMENT AREA

*Institute of Limnology RAS (9 Sevastyanova, 196105 St. Petersburg, Russia),
* kondratyev@limno.org.ru*

The aim of this study is to predict the possible changes in runoff from Lake Onego catchment using the three largest tributaries Shuya, Suna and Vodla as a case study for assessing expected climate change in the 21st century in accordance with the greenhouse gas emission scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5 – the best and the worst in terms of environmental impact, respectively. Information about the change in meteorological elements required for runoff calculations was obtained on the basis of the climate models MPI-ESM-MR and IPSL-CM5A. To assess the possible change in runoff as a result of changes in the regional climate, the runoff model ILHM was used. When both climate models are applied, a significant increase in air temperature in the RCP 8.5 scenario leads to an increase in the estimated values of evaporation, which largely compensates for the increase in river runoff due to increased precipitation. In the RCP 2.6 scenario, there are no significant changes in evaporation. A combination of RCP 2.6 and MPI-ESM-MR produces a slight decrease in runoff by the end of the 21st century. It can be assumed that the change in runoff from the catchment of Lake Onego will be in the interval between the estimates made in the two extreme scenarios and one should not expect extreme changes in the hydrological regime of rivers in this region.

Keywords: river runoff; water discharge; climate scenario; precipitation; air temperature; model

For citation: Kondratyev S. A., Shmakova M. V. Impact of future climate change on runoff in Lake Onego catchment area. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 41–49. doi: 10.17076/lim1581

Funding. The study was funded by the Russian Science Foundation grant #22-17-00193.

Введение

Онежское озеро – второе по величине пресноводное озеро Европы. В естественном состоянии имело площадь 9720 км² и принимало сток с водосборного бассейна площадью 53 100 км². После строительства в 1953 г. на р. Свирь Верхне-Свирской ГЭС озеро стало водохранилищем с площадью зеркала 9840 км² [Ресурсы..., 1972]. Около 70 % территории бассейна относится к Республике Карелия, остальная часть расположена в Ленинградской, Вологодской и Архангельской областях. Гидрографическую сеть бассейна Онежского озера образуют 6765 рек общей длиной 22 741 км и 9516 озер общей площадью 13 441 км². Более половины бассейна занято водосборами трех главных его притоков: рек Шуи (площадь водосбора 10,1 тыс. км²), Суны (7,7) и Водлы (13,7). Максимальное количество водотоков (95 %) составляют малые, длиной менее 10 км, и лишь реки Шуя, Суна, Водла и Андома имеют протяженность более 100 км [Онежское..., 2010] (рис. 1). По характеру водного режима реки бассейна относятся к восточноевропейскому типу, с высоким весенним половодьем, низкой летней и зимней меженью и увеличением стока в осенний период. Сток из озера осуществляется по реке Свирь, несущей свои воды в Ладожское озеро [Экосистема..., 1990].

На предыдущих этапах исследований Онежского озера значительное внимание уделялось изучению воздействия климатических факторов на гидрологический режим озера и его водосбора [Назарова и др., 2001; Кондратьев и др., 2008; Лозовик и др., 2016]. В прогностических оценках возможного изменения стока с водосбора использовался климатический сценарий, разработанный сотрудниками Института физики атмосферы РАН и Института озероведения РАН в конце 90-х годов прошлого века [Голицын и др., 2002]. Однако за последние десятилетия достигнуты значительные успехи в развитии климатических исследований, построены новые сценарии выброса парниковых газов, усовершенствована теория моделирования циркуляции атмосферы и океана, созданы региональные и глобальные климатические модели высокого разрешения [Climate..., 2014]. В этой связи целью настоящей работы явилась прогностическая оценка возможных изменений стока с водосбора Онежского озера на примере водосборов трех крупнейших притоков озера – рек Шуи, Суны и Водлы в результате предполагаемых изменений климата в 21 веке в соответствии со сценариями RCP (Representative Concentration Pathways) [van Vuuren et al., 2011; Wayne..., 2013].



Рис. 1. Схема расположения водосборов изучаемых рек
 Fig. 1. Schematic map of the catchments of the rivers under study

Материалы и методы

Для оценки последствий возможных климатических изменений использованы два RCP-сценария: RCP 2.6 и RCP 8.5 – лучший и худший с точки зрения воздействия на окружающую среду соответственно [Nakicenovic, Swart, 2000; Moss, 2010; Meinshausen, 2011; Rogelj et al., 2012]. Сценарий RCP 2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO_2) начали неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы метана (CH_4) должны уменьшиться наполовину, при этом уровень выбросов диоксида серы (SO_2) составит примерно 10 % от уровня 1980–1990 годов. В сценарии RCP 8.5 выбросы продолжают расти в течение всего 21 века теми же темпами, что и сейчас. Цифры в аббревиатурах сценариев (2.6 и 8.5) указывают на дополнительное количество энергии излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2/\text{с}$), которое будет накоплено атмосферой в результате выбросов парниковых газов.

Значения метеорологических параметров (осадков и температуры воздуха), соответствующих реализации сценариев социально-экономической деятельности человека RCP в изучаемом регионе на период до 2100 года, рассчитаны с использованием климатических моделей MPI-ESM-MR (Институт Макса Планка, Германия) и IPSL-CM5A (Институт Пьера Симона Лап-

ласа, Франция), участвующих в Фазе 5 Проекта взаимного сравнения моделей Всемирной программы исследований климата (WCRP CMIP5), рекомендованных в Пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2014 году. Получение необходимых для расчетов данных осуществлялось путем подачи соответствующего запроса, включающего координаты места (в нашем случае – метеостанции Петрозаводск), название климатических моделей (MPI-ESM-MR и IPSL-CM5A), тип RCP-сценария (RCP 2.6 и RCP 8.5), названия метеорологических переменных и временное разрешение данных на сайте Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [CORDEX..., 2021].

Средние значения метеорологических элементов (среднегодовых значений температуры воздуха и годовых слоев осадков) за периоды 2006–2020 и 2086–2100 гг., полученные для разных сценариев выброса парниковых газов (RCP 2.6 и RCP 8.5) и рассчитанные по разным климатическим моделям (MPI-ESM-MR и IPSL-CM5A), содержатся в табл. 1.

Представленные данные иллюстрируют возможное возрастание значений метеорологических параметров к концу 21 века во всех случаях за исключением реализации сценария RCP 2.6 по немецкой модели MPI-ESM-MR,

Таблица 1. Средние значения среднегодовой температуры воздуха (°С) и осадков (мм/год) за периоды 2006–2020 и 2086–2100 гг. при реализации различных сценариев выброса парниковых газов и рассчитанные по разным климатическим моделям

Table 1. Mean values of mean annual air temperature (°C) and precipitation (mm/year) for the periods 2006–2020 and 2086–2100 under different scenarios of greenhouse gas emissions and calculated by different climate models

Модель Model	RCP 2.6		RCP 8.5	
	2006–2020	2086–2100	2006–2020	2086–2100
Годовой слой осадков, мм/год Annual precipitation, mm/year				
MPI-ESM-MR	770	755	755	956
IPSL-CM5A	863	998	925	1010
Среднегодовая температура воздуха, °С Average annual temperature, °C				
MPI-ESM-MR	3,0	3,9	3,3	8,2
IPSL-CM5A	3,0	3,2	2,9	6,7

т. е. для случая максимально возможного сокращения выбросов парниковых газов. Максимальное увеличение как осадков, так и температуры воздуха дает реализация сценария RCP 8.5, согласно которому выбросы продолжают расти в течение всего 21 века теми же темпами, что и сейчас. Максимальное возрастание осадков может составить 27 %, температуры воздуха – 148 % по отношению к уровню 2006–2020 гг. (RCP 8.5, MPI-ESM-MR).

Источником метеорологической информации, необходимой для расчетов стока, послужили материалы наблюдений МС Петрозаводск, имеющиеся в открытом доступе. По данным мониторинга СЗУГМС, среднегодовая температура воздуха и годовой слой осадков (мм/год) по МС Петрозаводск за 2006–2020 гг. составили соответственно 4,0 °С и 610 мм/год. Средние значения слоя годового стока оцениваются в 380 мм/год для р. Водлы, 363 мм/год для р. Суны и 318 мм/год для р. Шуи.

Для решения задачи оценки возможного изменения стока притоков Онежского озера в результате изменений регионального климата использована модель формирования стока на водосборе ILHM [Кондратьев, Шмакова, 2019], предназначенная для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде

однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, могут задаваться в зависимости от озерности, т. е. доли площади водоемов в общей площади водосбора.

Калибровка и верификация модели проводилась по данным измерений расходов воды на рассматриваемых реках (рис. 1) в створах Северо-Западного УГМС. Для калибровки модели использовались большая часть имеющихся измеренных значений расходов воды (2008–2015 гг.) в створах изучаемых рек. Верификация проводилась по результатам сравнения измеренных и рассчитанных значений расходов воды за последние годы (2016–2019 гг.). Результаты калибровки и верификации модели формирования стока ILHM представлены на рис. 2. Полученное значение критерия Нэша – Сатклифа NS (83 % для Шуи, 65 % для Суны и 83 % для Водлы) является подтверждением адекватности модели изучаемым процессам формирования стока на водосборе.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлен годовой ход прогнозных значений среднегодовой температуры воздуха и годовых слоев осадков для текущего столетия по сценариям RCP 2.6 и RCP 8.5, оцененным по модели MPI-ESM-MR для условий водосбора Онежского озера. Кроме того, на этом рисунке приведены результаты расчета испарения с водосбора р. Водлы и ее годового стока по модели формирования стока ILHM. Аналогичная информация, полученная на основе климатической модели IPSL-CM5A, представлена на рис. 4.

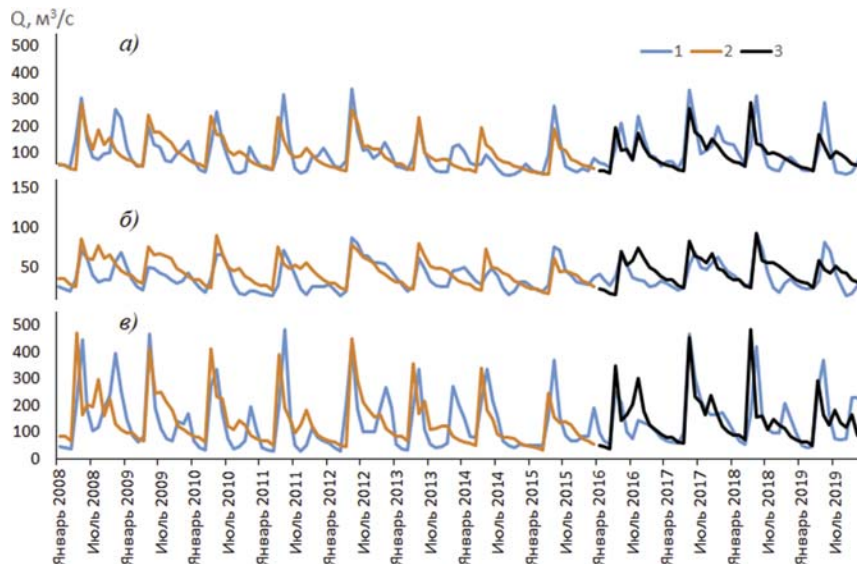


Рис. 2. Сравнение измеренных и рассчитанных гидрографов стока (мм/мес.) с водосборов рек Шуи, створ – д. Бесовец, 95 060 км² (а), Суны, створ – пгт. Поросозеро, 3370 км² (б) и Водлы, створ – г. Пудож, 12 000 км² (в): 1 – измерения СЗУГМС, 2 – результаты калибровки модели стока ILHM, 3 – результаты ее верификации

Fig. 2. Comparison of the measured and calculated runoff hydrographs (mm/month) from the catchments of the Shuya River, Besovets village, 95 060 km² (a), the Suna River, Porosozero settlement, 3370 km² (b) and the Vodla River, Pudozh city, 12 000 km² (v):

1 – measurements by Roshydromet, 2 – results of ILHM runoff model calibration, 3 – results of its verification

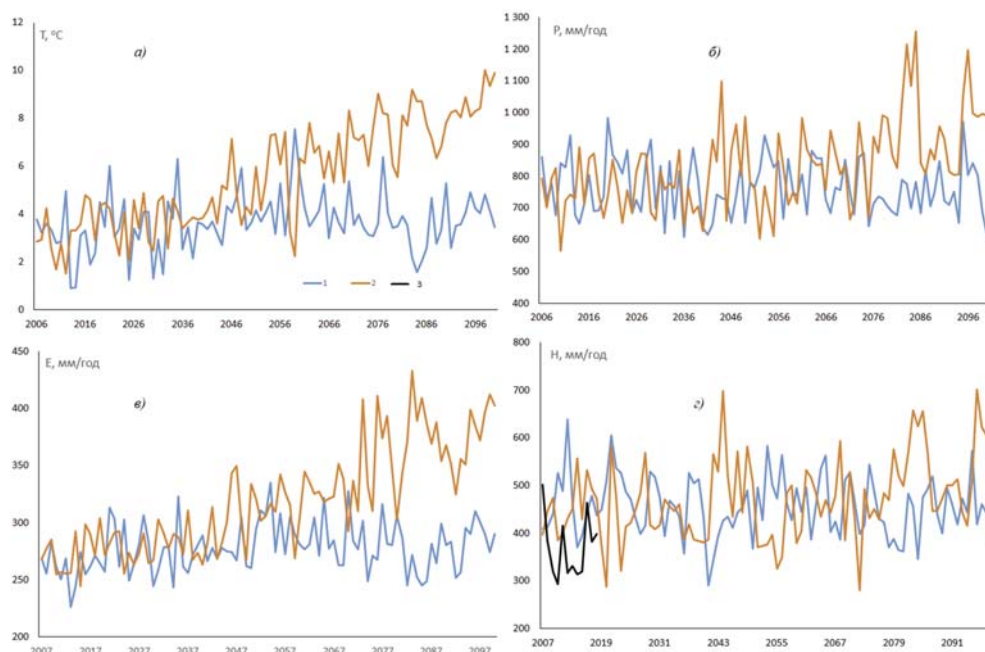


Рис. 3. Возможные изменения среднегодовых осадков (а) и температуры воздуха (б) в соответствии с моделью MPI-ESM-MR, а также рассчитанные значения испарения с водосбора (в) и стока р. Водлы (г) на перспективу до 2100 г. Здесь и на рис. 4: 1 – RCP 2.6, 2 – RCP 8.5, 3 – измерения СЗУГМС

Fig. 3. Possible changes in mean annual precipitation (a) and air temperature (б) in accordance with the MPI-ESM-MR model, as well as calculated values of evaporation from the catchment (в) and Vodla River runoff (г) for the future until 2100.

Here and in Fig. 4: 1 – rcp 2.6, 2 – rcp 8.5, 3 – measurements by Roshydromet

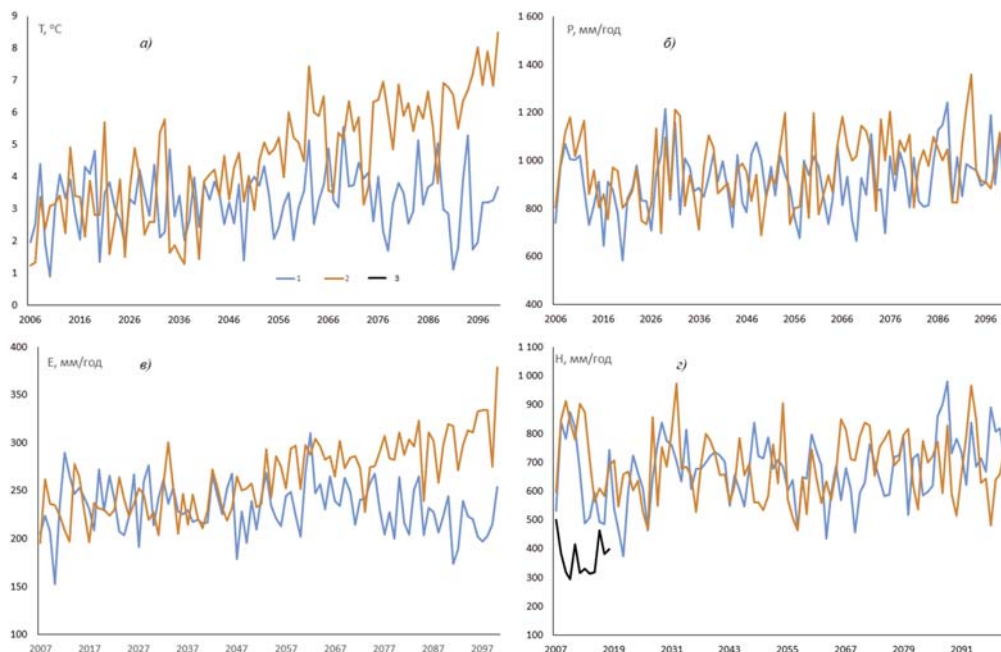


Рис. 4. Возможные изменения среднегодовых осадков (а) и температуры воздуха (б) в соответствии с моделью IPSL-CM5A, а также рассчитанные значения испарения с водосбора (в) и стока р. Водлы (г) на перспективу до 2100 г.

Fig. 4. Possible changes in mean annual precipitation (a) and air temperature (б) according to IPSL-CM5A model and calculated values of evaporation from the catchment (в) and Vodla river runoff (г) for the perspective until 2100

Нетрудно видеть, что при использовании материалов обеих климатических моделей существенное увеличение температуры воздуха в сценарии RCP 8.5 приводит к увеличению расчетных значений испарения, которое в высокой степени компенсирует увеличение стока реки за счет возрастания осадков. В сценарии RCP 2.6 значимых изменений испарения не происходит. А в случае сочетания RCP 2.6 и MPI-ESM-MR отмечается небольшое снижение стока к концу 21 века.

Сравнение полученных спрогнозированных среднегодовых расходов воды и их измеренных значений, выполненное на основании рис. 3 и 4, выявило завышение стока, смоделированного с использованием материалов модели IPSL-CM5A, по отношению к реальному в начале 21 века (рис. 4, г). Поэтому при последующем анализе рассматривались результаты, полученные по климатической модели MPI-ESM-MR. В табл. 2 представлены рассчитанные средние значения годового стока трех исследуемых рек для рассматриваемых двух сценариев выбросов парниковых газов.

В результате к концу 21 века среднегодовой сток с водосбора р. Водлы при реализации сценария RCP 8.5 увеличивается не более чем на 18 % относительно периода 2006–2015 годов. В то же время сценарий RCP 2.6 дает сни-

жение стока также на 18 % (MPI-ESM-MR), так как здесь отмечается небольшое возрастание температуры воздуха, а осадки имеют отрицательный тренд (табл. 1). Эта же тенденция, хотя и менее выраженная, характерна и для рек Шуи и Суны.

Как отмечалось выше, рассмотренные сценарии отражают лучший (RCP 2.6) и худший (RCP 8.5) варианты антропогенного воздействия на окружающую среду. Скорее всего, ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию, так как, с одной стороны, человечество предпринимает значительные усилия по снижению выбросов в атмосферу, с другой, едва ли удастся даже к концу 21 века достигнуть абсолютного внедрения «зеленых технологий» во все сферы хозяйственной деятельности на всей планете. А следовательно, и прогностическая оценка последствий климатических изменений будет находиться в промежутке между оценками, сделанными в настоящей работе по экстремальным сценариям. Таким образом, можно заключить, что не стоит ожидать экстремальных изменений гидрологического режима притоков Онежского озера.

Анализ различий во внутригодовой динамике метеорологических величин, рассчитанных

по модели MPI-ESM-MR для различных сценариев выброса парниковых газов, показал относительно равномерное возрастание температуры воздуха при переходе от RCP 2.6 к RCP 8.5 для всех сезонов года (рис. 5, а). Количество выпавших осадков при реализации сценария RCP 8.5 существенно увеличится в осенне-зимний период

и немного снизится в начале лета (рис. 5, б) по сравнению с экологически благоприятным сценарием. Согласно результатам моделирования, итогом указанных различий может стать смещение рассчитанного пика весеннего половодья при относительном постоянстве слоя годового стока, как это показано на рис. 5 (в).

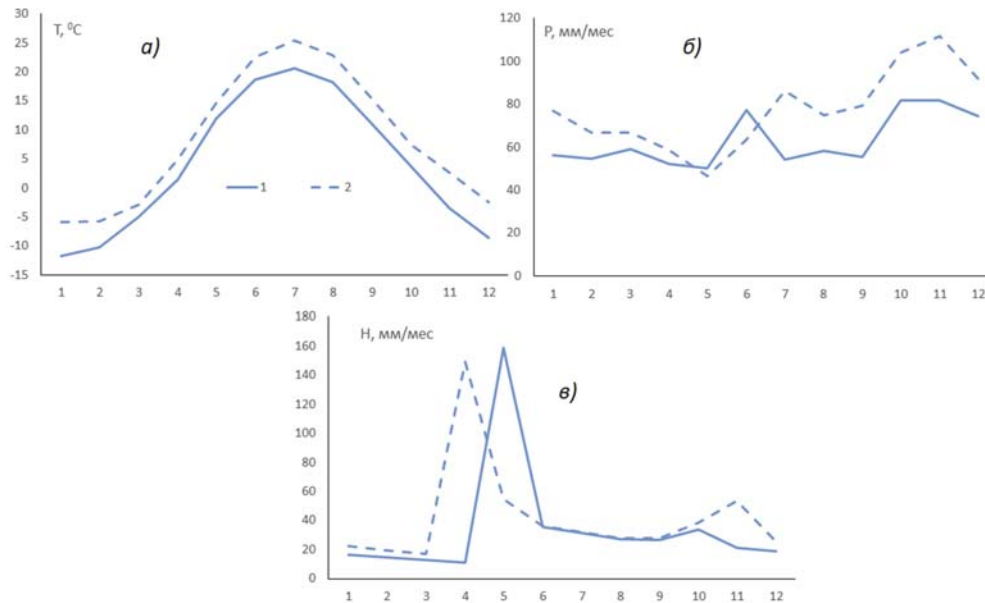


Рис. 5. Среднемесячная температура воздуха Т (а), месячные слои осадков Р (б) для условий м/ст. Петрозаводск, а также рассчитанные значения стока с водосбора р. Водлы (в) за период 2086–2100 гг.:

1 – RCP 2.6, 2 – RCP 8.5. Климатическая модель MPI-ESM-MR

Fig. 5. Mean monthly air temperature T (a), monthly precipitation P (б) for the Petrozavodsk station and calculated Vodla River runoff (в) for the period 2086–2100:

1 – RCP 2.6, 2 – RCP 8.5. MPI-ESM-MR climatic model

Заключение

Следует заметить, что составление каких-либо оценок и прогнозов развития социально-экономической деятельности населения Земли, а соответственно, и выбросов парниковых газов в атмосферу, на перспективу до 2100 г. является весьма неблагоприятным занятием, тем более в настоящее время. Именно поэтому в работе рассмотрены только экстремальные сценарии развития ситуации, отражающие лучший (RCP 2.6) и худший (RCP 8.5) варианты антропогенного воздействия на окружающую среду. Разумно предположить, что ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию. Сделанные оценки последствий реализации этих сценариев (табл. 2) показывают, что разброс возможных будущих изменений

стока рек Шуи, Суны и Водлы не превосходит $\pm 18\%$ от современных значений. Из сказанного следует, что едва ли в рассматриваемом регионе произойдут экстремальные изменения гидрологического режима речных водосборов. Сделанный вывод качественно сходен с результатами работы [Добровольский, 2017], из которой следует, что бассейн Онежского озера расположен на территории, где прогнозируемые значения слоя стока меньше, чем среднеквадратичная ошибка этого прогноза.

Возможно выполнить уточнение проделанных расчетов гидрографов стока изучаемых рек за счет проведения дополнительной корректировки сценариев изменения осадков и температуры воздуха посредством введения корректирующих коэффициентов, компенсирующих различия между измеренными и прогнозными значениями за 2006–2020 гг.

Таблица 2. Рассчитанные средние значения годового стока исследуемых рек (мм/год). Климатическая модель MPI-ESM-MR

Table 2. Calculated mean annual of the studied rivers runoff (mm/year). MPI-ESM-MR climatic model

RCP 2.6			RCP 8.5		
2006–2020	2086–2100	%	2006–2020	2086–2100	%
р. Водла Vodla River					
497	408	–18	429	505	18
р. Суна Suna River					
523	490	–6,3	503	525	4.3
р. Шуя Shuya River					
424	393	–7,3	415	481	16

Эта процедура выполнена на предыдущих этапах исследований [Кондратьев и др., 2008]. Однако такого рода уточнения результатов расчета не повлияют на основной вывод, касающийся отсутствия перспектив экстремальных изменений гидрологического режима водосборов притоков Онежского озера. Не стоит забывать, что в этом случае возникает вопрос о соответствии данных измерений и рассчитанных значений расхода воды для периода 2006–2020 гг., который является «разгонным» для используемых климатических моделей.

Кроме того, важно помнить, что теоретические аспекты воздействия изменений климата на окружающую среду, и водные системы в частности, находятся в стадии интенсивного развития. Весьма вероятно, что в скором времени будут разработаны новые сценарии эмиссии парниковых газов и климатические модели, имеющие гораздо более серьезное научное обоснование. Поэтому нужно быть готовым к уточнению прогностических оценок воздействия будущих изменений климата на водные системы.

Литература

Голицын Г. С., Ефимова Л. К., Мохов И. И., Семенов В. В., Хон В. Ч. Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI // Известия РГО. 2002. Т. 134(6). С. 80–87.

Добровольский С. Г. Глобальная гидрология. М.: Геос, 2017. 525 с.

Кондратьев С. А., Назарова Л. Е., Бовыкин И. В., Шмакова М. В., Маркова Е. Г. Водный режим водосбора Онежского озера под воздействием изменений климата // Известия РГО. 2008. Т. 140(3). С. 21–26.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натуральных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Назарова Л. Е., Сало Ю. А., Филатов Н. Н. Изменения климата и водные ресурсы Восточной Фенноскандии (препринт). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2001. 34 с.

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 700 с.

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Ред. З. С. Кауфман. Л.: Наука, 1990. 264 с.

Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

CORDEX regional climate model data on single levels / European Centre for Medium-Range Weather Forecast. 2021. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview> (дата обращения: 11.05.2022).

Meinshausen M. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 213–241. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z

Moss R. H. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature. 2010. Vol. 463. P. 747–756. doi: 10.1038/nature08823

Nakicenovic N., Swart R. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, 2000. 129 p.

Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates // Nature Clim. Change. 2012. No. 2. P. 248–253. doi: 10.1038/nclimate1385

van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S. K. The representative concentration pathways: an overview // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 5–31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z

Wayne G. P. The beginner's guide to representative concentration pathways. *Skeptical Science*, August 2013. 24 p.

References

Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland; 2014. 151 p.

CORDEX regional climate model data on single levels / European Centre for Medium-Range Weather Forecast. 2021. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview> (accessed: 11.05.2022).

Dobrovolskii S. G. *Global hydrology*. Moscow: Geos; 2017. 525 p. (In Russ.)

Kaufman Z. S. (ed.). *Ecosystem of Lake Onega and trends of its changes*. Ed. Leningrad: Nauka; 1990. 264 p. (In Russ.)

Golitsyn G. S., Efimova L. K., Mokhov I. I., Semenov V. V., Khon V. Ch. Temperature and precipitation changes in the Lake Ladoga basin according to the calculations of the climate model of general circulation in XIX–XXI. *Izvestiya RGO – The RGS Herald*. 2002;134(6):80–87. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Nazarova L. E., Bovykin I. V., Shmakova M. V., Markova E. G. Water regime in the catchment area of Lake Onega under the impact of climate change. *Izvestiya RGO – The RGS Herald*. 2008;140(3):21–26. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the system catchment – watercourse – reservoir. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2019. 246 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Biogenic load on Lake Onega according to field observations *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN – Transactions of the Karelian Research Centre of the RAS*. 2016;5:35–52. doi: 10.17076/lim303 (In Russ.)

Meinshausen M. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*. 2011;109:213–241. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z

Moss R. H. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010;463:747–756. doi: 10.1038/nature08823

Nazarova L. E., Salo Yu. A., Filatov N. N. Climate change and water resources in Eastern Fennoscandia (preprint). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. 34 p. (In Russ.)

Nakicenovic N., Swart R. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press; 2000. 129 p.

Filatov N. N. (ed.). *Lake Onego. Atlas*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)

Surface Water Resources of the USSR. T. 2. Karelia and Northwest. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1972. 700 p. (In Russ.)

Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Clim. Change*. 2012;2:248–253. doi: 10.1038/nclimate1385

van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S. K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*. 2011;109:5–31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z

Wayne G. P. The beginner's guide to representative concentration pathways. *Skeptical Science*, August 2013. 24 p.

Поступила в редакцию / received: 13.05.2022; принята к публикации / accepted: 18.07.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кондратьев Сергей Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник

e-mail: kondratyev@limno.org.ru; 3718470@gmail.com

Шмакова Марина Валентиновна

д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: m-shmakova@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Kondratyev, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher

Shmakova, Marina

Dr. Sci. (Geog.), Leading Researcher

УДК 504

ТРОФИЧЕСКИЙ СТАТУС ОЗЕРА ИЛЬМЕНЬ (ПО ДАННЫМ 2003–2020 ГОДОВ)

Г. Т. Фрумин^{1*}, О. В. Терещенко²

¹ *Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена (наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186), *gfrumin@mail.ru*

² *Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, Великий Новгород, Россия, 173003)*

Выполнена оценка трофического состояния озера Ильмень, одного из наиболее продуктивных в Северо-Западном регионе европейской части России, за период 2003–2020 гг. на основе двух различных показателей. Первый из них – индекс трофического состояния (ITS). Расчет этого индекса базируется на двух гидрохимических параметрах: величине рН и проценте насыщения воды кислородом. Другой использованный индикатор трофического статуса – среднегодовая концентрация фосфора общего. Проведен расчет межгодовых значений ITS в указанный период. Для расчетов использованы первичные данные мониторинга озера, регулярно осуществляемого Северо-Западным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Установлено, что в 2003–2020 гг. трофическое состояние озера Ильмень определялось в основном как эвтрофное, за исключением 2006, 2008, 2017 и 2019 гг., когда водоем характеризовался как мезотрофный. По концентрации фосфора общего в 2003 г. трофическое состояние озера определено как гипертрофное, в 2018 г. оно было мезотрофным, в остальные годы – эвтрофным. Результаты исследования целесообразно применить для принятия эффективных управленческих решений о снижении фосфорной антропогенной нагрузки на озеро.

Ключевые слова: озеро; эвтрофирование; индекс трофического состояния; концентрация фосфора общего; классификация трофических состояний

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Терещенко О. В. Трофический статус озера Ильмень (по данным 2003–2020 годов) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 50–57. doi: 10.17076/lim1555

Финансирование. Работа выполнена в Российском государственном педагогическом университете им. А. И. Герцена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минпросвещения России (проект № FSN-2020-0016).

G. T. Frumin^{1*}, O. V. Tereshchenko². TROPHIC STATUS OF LAKE ILMEN (2003–2020)

¹ *Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Nab. R. Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia), *gfrumin@mail.ru*

² *Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (41 Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., 173003 Veliky Novgorod, Russia)*

Lake Ilmen is one of the most productive lakes in the northwestern part of European Russia. The purpose of the study was to assess the trophic status of the Ilmen in the period 2003–2020 based on two different indicators. The trophic status index (ITS) is calculated from two hydrochemical indicators: the pH value and the percentage of water saturation with oxygen. The other indicator of the trophic status is the average annual concentration of total phosphorus. Interannual ITS values for the period from 2003 to 2020 were determined. The input for the calculations was data from lake monitoring regularly conducted by the North-Western Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring. It has been established that the trophic status of Lake Ilmen in the specified period was mainly characterized as eutrophic except for years 2006, 2008, 2017, and 2019, when it was mesotrophic. According to the concentration of total phosphorus in 2003, the trophic status of the lake was characterized as hypertrophic, in 2018 as mesotrophic, while in other years it was eutrophic. It is advisable to apply the results of the study in decision-making for reducing the anthropogenic phosphorus loading on the lake.

Keywords: lake; eutrophication; trophic state index; total phosphorus concentration; classification of trophic states

For citation: Frumin G. T., Tereshchenko O. V. Trophic status of Lake Ilmen (2003–2020). *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 50–57. doi: 10.17076/lim1555

Funding. The study was performed at the Herzen State Pedagogical University of Russia under state assignment with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project # FSZN-2020-0016).

Введение

Озеро Ильмень является одним из наиболее продуктивных озер Северо-Западного региона европейской части России [Смирнова, 1974; Бойцов и др., 1997; Кузьмина, Кузнецова, 2014; Несветова, Бойцов, 2018]. «Сток из Ильменя осуществляется через реку Волхов, в истоке которой расположен г. Великий Новгород. Для города озеро является одним из главных источников пресной воды, обостряющийся дефицит которой занимает особое место в числе глобальных экологических проблем» [Кузьмина и др., 2011].

«Среди современных проблем водной экологии центральное место занимает проблема эвтрофирования» [Хендерсон-Селлерс, Марклэнд, 1990]. Эвтрофирование – повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов под действием антропогенных и естественных (природных) факторов. Среди биогенных элементов, влияющих на процесс эвтрофирования, для водоемов умеренной зоны решающую роль играет фосфор [Россоломо, 1977].

Развитие процесса антропогенного эвтрофирования приводит ко многим неблагоприятным последствиям с точки зрения водопользования и водопотребления (развитие «цветения» и ухудшение качества воды, появление анаэробных зон, нарушение структуры биоценозов

и исчезновение многих видов гидробионтов, в том числе ценных промысловых рыб) [Батян и др., 2009]. Типичная причина эвтрофирования водоемов – увеличение биогенной нагрузки, а типичное последствие – бурное «цветение» цианобактерий с последующим отмиранием их избыточной биомассы, выделением токсинов, нарушением кислородного режима и т. д. [Фрумин, Хуан, 2012]. Как национальную проблему рассматривают токсичные цветения озер в Англии, Финляндии, Норвегии. В литературе описаны наблюдения токсигенных цианобактерий в ряде озер Карелии и в Невской губе восточной части Финского залива. Токсины могут вызывать цирроз печени, дерматиты у людей, отравление и гибель животных [Громов, 1996].

Поскольку эвтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО начаты работы по мониторингу внутренних вод, контролю за эвтрофированием водоемов земного шара [Дмитриев, Фрумин, 2004; Фрумин, 2008; Фрумин, Гильдеева, 2013].

Проблема эвтрофирования озера Ильмень была [Дмитриев и др., 1989; Дмитриев, 1995] и остается актуальной до настоящего времени. К сожалению, в доступных авторам данной статьи литературных источниках не удалось найти публикаций, посвященных оценке трофического статуса этого озера. Актуальность проведенного исследования обусловлена необходимостью оценки трофического статуса озера Ильмень

для последующего обоснования природоохранными организациями управленческих решений о необходимом снижении антропогенной биогенной нагрузки со стоком рек и с водосбора.

Цель исследования – оценка трофического состояния озера Ильмень за период 2003–2020 гг. на основе двух различных показателей трофического статуса.

Материалы и методы

Для оценки трофического состояния озера Ильмень применены два показателя: индекс трофического состояния – ITS (Index of trophical state) и среднегодовая концентрация фосфора общего.

Метод расчета величин ITS подробно описан [Временные..., 1991; Способ..., 1995; Цветкова и др., 2001; Булгаков, Шишкин, 2008; Неверова-Дзиопик, Цветкова, 2020; Фрумин, Мурадлы, 2020].

Оценка трофического состояния озера проведена по классификации, приведенной в табл. 1.

Согласно OECD (Организация экономического сотрудничества и развития), при концентрации фосфора общего < 4 мкг/дм³ трофический статус характеризуется как ультраолиготрофный, при < 10 мкг/дм³ – как олиготрофный, в интервале 10–35 мкг/дм³ – как мезотрофный, в интервале 35–100 мкг/дм³ – как эвтрофный и при > 100 мкг/дм³ – как гипертрофный [Фрумин, Хуан, 2012].

В работе использован пакет прикладных программ Excel и данные среднегодового гидрохимического мониторинга озера с 2003 по 2020 г. Первичные данные для расчетов заимствованы из ежегодников СЗ УГМС. Гидрохимические анализы проведены в аттестованной лаборатории Новгородского областного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Таблица 1. Классификация трофических состояний водного объекта [Алексеев и др., 2007]

Table 1. Classification of trophic states of a water body [Alekseev et al., 2007]

Продукционно-деструкционный баланс Production-destructive balance	Трофическое состояние Trophic state	ITS
Отрицательный, П < Д Negative, P < D	Дистрофное Dystrophic	< 5,7 ± 0,3
	Ультраолиготрофное Ultraoligotrophic	6,3 ± 0,3
Нулевой, П = Д Zero, P = D	Олиготрофное Oligotrophic	7,0 ± 0,3
Положительный, П > Д Positive, P > D	Мезотрофное Mesotrophic	7,7 ± 0,3
	Эвтрофное Eutrophic	> 8,3 ± 0,3

Расположение вертикалей отбора проб воды представлено на рис. 1. Пробы отбирались из различных субакваторий озера, что позволило провести корректную оценку трофического статуса в целом по озеру. Наименьшее количество проб (24) было отобрано в 2011 г., а наибольшее (56) – в период 2013–2020 гг.

Результаты и обсуждение

Результаты математико-статистической обработки первичных данных мониторинга представлены на рис. 2 и 3. Данные, приведенные на рис. 2, показывают трофический статус озера в 2006, 2008, 2017 и 2019 гг. как мезотрофный, в остальные годы водоем был эвтрофным.

Для качественной оценки трендов использована шкала Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002]. Шкала Чеддока, как качественная статистическая характеристика, успешно применяется в медицине, экономике, маркетинге, социологии и других науках. На рис. 2 и 3 представлены линии трендов и коэффициенты корреляции (r). По шкале Чеддока эти данные можно интерпретировать следующим образом: для ITS и концентраций фосфора общего тренды умеренные отрицательные.

Следуя данным рис. 2, можно предположить, что в перспективе уровень трофии озера будет снижаться с переходом от эвтрофного статуса к мезотрофному. Это предположение следует рассматривать как сугубо ориентировочное.

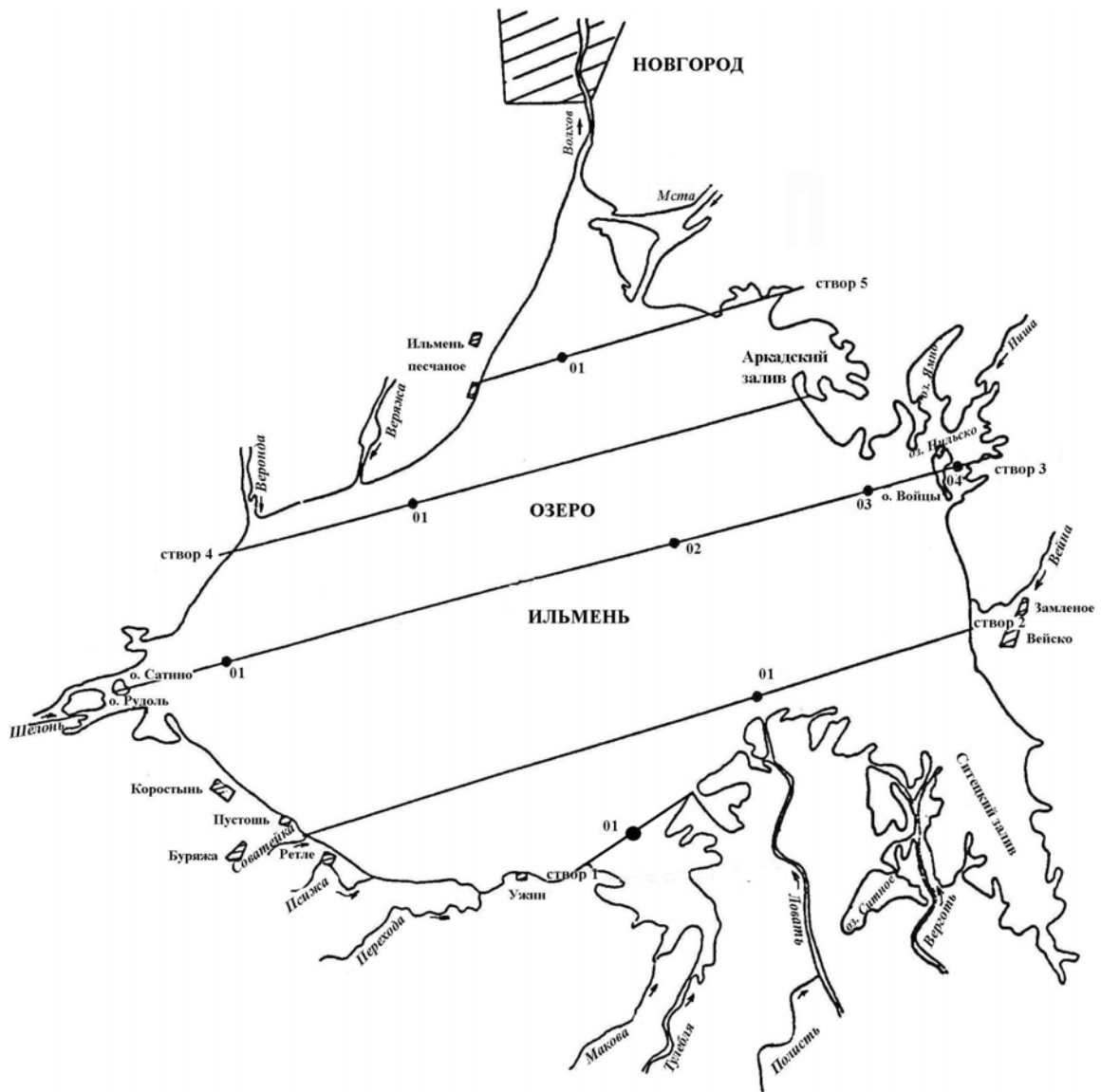


Рис. 1. Схема расположения вертикалей отбора проб на озере Ильмень

Fig. 1. The layout of sampling verticals on Lake Ilmen

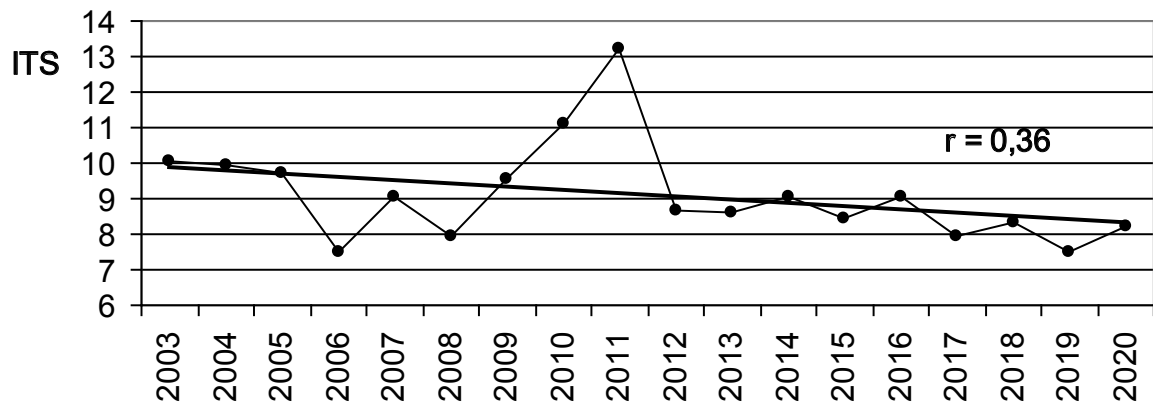


Рис. 2. Динамика индекса трофического состояния (статуса) озера Ильмень

Fig. 2. Dynamics of the trophic state (status) index of Lake Ilmen

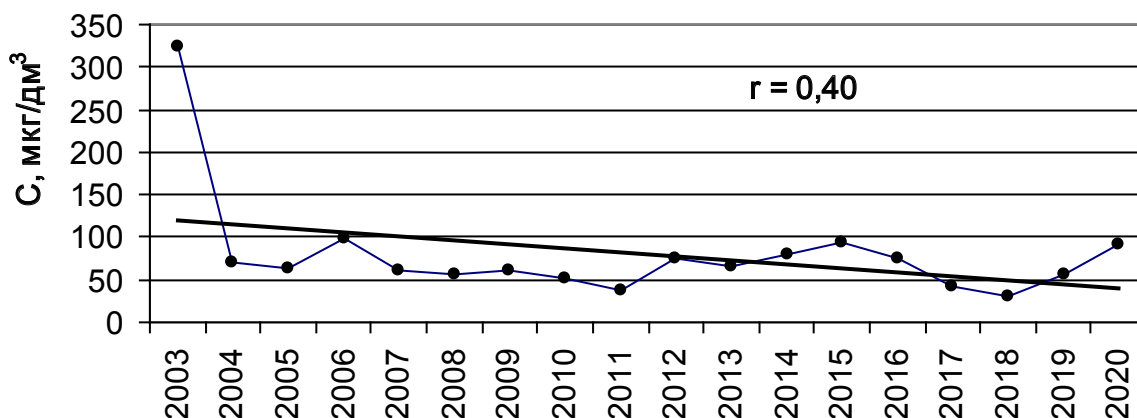


Рис. 3. Динамика концентраций фосфора общего в озере Ильмень

Fig. 3. Dynamics of total phosphorus concentrations in Lake Ilmen

Соотношение между величинами ITS и концентрациями фосфора общего статистически незначимо (коэффициент корреляции $r = 0,05$ при объеме выборки $n = 18$) [Макарова, Трофимец, 2002]. При исключении из массива данных «аномально» высокого

значения концентрации фосфора общего в 2003 г. (325 мкг/дм³) соотношение между ITS и концентрациями фосфора общего характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0,37$ («умеренная» теснота связи между переменными) (рис. 4).

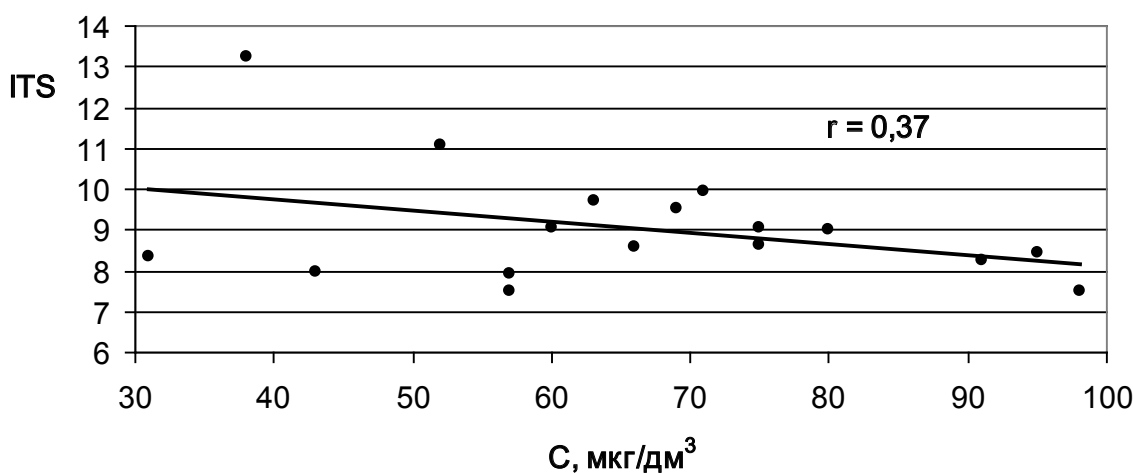


Рис. 4. Соотношение между концентрациями фосфора общего и величинами ITS

Fig. 4. Relationship between total phosphorus concentrations and ITS values

Высокое содержание фосфора общего в озере Ильмень обусловлено несколькими факторами: речным стоком, диффузным поступлением с водосборной территории и др. «Иногда наблюдаемый в водоеме уровень содержания биогенных элементов может быть следствием продукционных процессов, а не их причиной» [Несветова, Бойцов, 2018].

В обобщенном виде результаты проведенного анализа представлены в табл. 2.

По данным этой таблицы в подавляющем числе случаев трофический статус озера Ильмень характеризуется как эвтрофный. Такое состояние водоема за восемнадцатилетний период наблюдений определяется в течение четырнадцати лет при использовании в качестве индикатора ITS, что составляет 77,8 %, а при оценке по содержанию фосфора общего – 88,9 %.

Аналогичный результат оценки трофического состояния озера Ильмень приведен в ранее

Таблица 2. Трофический статус озера Ильмень

Table 2. Trophic status of Lake Ilmen

Год Year	Показатель Index	Трофический статус Trophic status	Показатель Index	Трофический статус Trophic status
	ITS		С, мкг/дм ³ С, µg/dm ³	
2003	10,03	эвтрофный eutrophic	325	гипертрофный hypertrophic
2004	9,93	«	71	эвтрофный eutrophic
2005	9,72	«	63	«
2006	7,49	мезотрофный mesotrophic	98	«
2007	9,05	эвтрофный eutrophic	60	«
2008	7,94	мезотрофный mesotrophic	57	«
2009	9,54	эвтрофный eutrophic	61	«
2010	11,1	«	52	«
2011	13,25	«	38	«
2012	8,65	«	75	«
2013	8,59	«	66	«
2014	9,03	«	80	«
2015	8,45	«	95	«
2016	9,06	«	75	«
2017	7,97	мезотрофный mesotrophic	43	«
2018	8,33	эвтрофный eutrophic	31	мезотрофный mesotrophic
2019	7,49	мезотрофный mesotrophic	57	эвтрофный eutrophic
2020	8,25	эвтрофный eutrophic	91	«

опубликованной монографии [Неверова-Дзиопик, Цветкова, 2020]. В этой работе представлены величины ITS за период 2003–2009 гг., из которого лишь в 2006 г. озеро характеризовалось как мезотрофное, в остальные годы трофическое состояние указанного водоема было эвтрофным.

Высокий трофический статус озера Ильмень обусловлен в основном высоким содержанием фосфора общего (растворенного). Средняя его концентрация за период 2003–2020 гг. была 80 (43–117) мкг/дм³.

Выводы

1. За период 2003–2020 гг. трофический статус озера Ильмень, оцениваемый индексами трофического состояния (ITS) и среднегодовыми концентрациями фосфора общего, характеризуется в основном как эвтрофный.

2. Эвтрофный трофический статус озера Ильмень обусловлен высоким содержанием в воде

озера фосфора общего (средняя концентрация за исследованный период 80 (43–117 мкг/дм³).

3. Для деэвтрофирования озера Ильмень необходимо снизить антропогенную фосфорную нагрузку со стоком из впадающих в него рек и с водосбора.

Литература

Алексеев М. И., Цветкова Л. И., Копина Г. И. Методика расчетов региональных нормативов экологического благополучия водных объектов (Невской губы и восточной части Финского залива). СПб.: СПбГАСУ, 2007. 36 с.

Батын А. Н., Фрумин Г. Т., Базылев В. Н. Основы общей и экологической токсикологии: учебное пособие. СПб.: СпецЛит, 2009. 352 с.

Бойцов А. В., Васильев В. Ю., Горбовская А. Д. Экосистема озера Ильмень и его поймы. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1997. 247 с.

Булгаков И. П., Шишкин А. И. Применение нового показателя трофического состояния водоема для решения инженерных задач // День Балтийского

моря: Сб. тезисов IX Международного экологического форума. СПб.: Диалог, 2008. С. 495–496.

Временные методические рекомендации по определению экологически допустимых концентраций (ЭДК) фосфора в воде водоемов для расчета экологически допустимых сбросов (ЭДС) фосфора со сточными водами в целях предотвращения эвтрофирования. Л.: ЛИСИ, 1991. 37 с.

Громов Б. В. Цианобактерии в биосфере // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 33–39.

Дмитриев В. В., Третьяков В. Ю., Васильев В. Ю. Моделирование годового цикла функционирования водной экосистемы озера Ильмень // Сб. научных трудов ГосНИОРХ. 1989. Вып. 302. С. 85–92.

Дмитриев В. В. Диагностика и моделирование водных экосистем. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1995. 216 с.

Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: СПбГУ, РГГМУ, 2004. 294 с.

Кузьмина И. А., Кузнецова О. В., Асанова Т. А. Гидрологическая, геохимическая и биоиндикационная характеристика озера Ильмень // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. №1(6). С. 1438–1442.

Кузьмина И. А., Кузнецова О. В. Анализ результатов гидро- и геохимического мониторинга озера Ильмень // Вестник Новгородского государственного университета. 2014. № 76. С. 69–73.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. СПб.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

Неверова-Дзюпик Е., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.

Несветова Г. И., Бойцов В. Д. Гидрохимическая характеристика озера Ильмень // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 50. С. 66–80.

Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.

Способ определения экологического состояния пресноводных водоемов. Патент РФ № 2050128 от 20 декабря 1995 г., патентообладатели Л. И. Цветкова, В. Н. Пономарева, Т. И. Копина, Е. В. Неверова-Дзюпик.

Смирнова Л. Ф. Гидрологический и гидрохимический режимы озера Ильмень // Известия ГосНИОРХ. 1974. Т. 86. С. 3–11.

Фрумин Г. Т. Экологические проблемы гидросферы // Современные проблемы экологии. СПб.; Киев: Крисмас+, 2008. С. 192–230.

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

Фрумин Г. Т., Гильдеева И. М. Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема // Экологическая химия. 2013. Т. 22(4). С. 191–197.

Фрумин Г. Т., Мурадлы М. А. Динамика трофического статуса Нарвского водохранилища (по данным 2011–2019 гг.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 65–71. doi: 10.17076/1300

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.

Цветкова Л. И., Алексеев М. И., Кармазинов Ф. В., Неверова-Дзюпик Е. В., Усанов Б. П., Жукова Л. И. Экология: Учебник для технических вузов / Под ред. Л. И. Цветковой. М.: АСВ; СПб.: Химиздат, 2001. 552 с.

References

Alekseev M. I., Tsvetkova L. I., Kopina G. I. A method for calculating regional standards for the ecological well-being of water bodies (Neva Bay and the eastern part of the Gulf of Finland): St. Petersburg: SPbGASU; 2007. 36 p.

Batyan A. N., Frumin G. T., Bazylev V. N. Fundamentals of general and environmental toxicology: A study guide. St. Petersburg: SpetsLit; 2009. 352 p. (In Russ.)

Boitsov A. V., Vasil'ev V. Yu., Gorbovskaya A. D. Ecosystem of Lake Ilmen and its floodplain. St. Petersburg: St. Petersburg Univ.; 1997. 247 p. (In Russ.)

Bulgakov I. P., Shishkin A. I. Application of a new indicator of the trophic state of a reservoir for solving engineering problems. *Den' Baltiiskogo morya: Sb. tez. IX Mezhdunar. ekol. foruma = Baltic Sea Day: Proceed. IX international environ. forum.* St. Petersburg: Dialog; 2008. P. 495–496. (In Russ.)

Dmitriev V. V., Tret'yakov V. Yu., Vasil'ev V. Yu. Modeling of the annual cycle of the aquatic ecosystem functioning of Lake Ilmen. *Sb. nauch. trudov GosNIORKh = Proceed. National Research Institute of Lake and River Fisheries.* 1989;302:85–92. (In Russ.)

Dmitriev V. V. Diagnostics and modeling of aquatic ecosystems. St. Petersburg: St. Petersburg Univ.; 1995. 216 p. (In Russ.)

Dmitriev V. V., Frumin G. T. Ecological regulation and sustainability of natural systems. St. Petersburg: SPbSU, RSHU; 2004. 294 p. (In Russ.)

Frumin G. T. Environmental problems of the hydrosphere. *Sovremennye problemy ekologiyeny = Current Problems of Environmental Hygiene.* St. Petersburg; Kiev: Krimas+; 2008. P. 192–230. (In Russ.)

Frumin G. T., Khuan Zh.-Zh. Probabilistic assessment of the trophic status of water bodies. A toolkit. St. Petersburg: RSHU; 2012. 28 p. (In Russ.)

Frumin G. T., Gil'deeva I. M. Eutrophication of water bodies is a global environmental problem. *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry.* 2013;22(4): 191–197. (In Russ.)

Frumin G. T., Muradly M. A. Dynamics of the trophic status of the Narva storage reservoir (2011–2019). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre of RAS.* 2020;9:65–71. doi: 10.17076/1300 (In Russ.)

Gromov B. V. Cyanobacteria in the biosphere. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal.* 1996;9:33–39. (In Russ.)

Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. R. Dying lakes. The causes and control of anthropogenic eutrophication. Leningrad: Gidrometeizdat; 1990. 280 p. (In Russ.)

Kuz'mina I. A., Kuznetsova O. V., Asanova T. A. Hydrological, geochemical and bioindicative characteristics of Lake Ilmen. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;1(6): 1438–1442. (In Russ.)

Kuz'mina I. A., Kuznetsova O. V. Analysis of the results of hydro- and geochemical monitoring of Lake Ilmen. *Vestnik Novgorodskogo gos. universiteta = Vestnik NovSU*. 2014;76:69–73. (In Russ.)

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. *Statistics in Excel*. St. Petersburg: Finance and statistics; 2002. 368 p. (In Russ.)

Neverova-Dziopik E., Tsvetkova L. I. Assessment of the trophic state of surface waters. St. Petersburg: SPbGASU; 2020. 176 p. (In Russ.)

Nesvetova G. I., Boitsov V. D. Hydrochemical characteristics of Lake Ilmen. *Uchenye zapiski RGGMU = Proceed. of RSHU*. 2018;50:66–80. (In Russ.)

Rossolimo L. L. Changes in limnic ecosystems under anthropogenic impact. Moscow: Nauka, 1977. 144 p.

Smirnova L. F. Hydrological and hydrochemical regimes of Lake Ilmen. *Izvestiya GosNIORKh (National Research Institute of Lake and River Fisheries)*. 1974;86:3–11. (In Russ.)

Temporary guidelines for determining environmentally acceptable concentrations (EDC) of phosphorus in the reservoirs water for the calculation of environmentally acceptable discharges (EMF) of phosphorus with wastewater in order to prevent eutrophication. Leningrad: LISI; 1991. 37 p. (In Russ.)

Tsvetkova L. I., Alekseev M. I., Karmazinov F. V., Neverova-Dziopik E. V., Usanov B. P., Zhukova L. I. *Ecology: A textbook for technical universities*. Moscow: IZD-VO ASV; St. Petersburg: Khimizdat; 2001. 552 p. (In Russ.)

Tsvetkova L. I., Ponomareva V. N., Kopina T. I., Neverova-Dziopik E. V. A method for determining the ecological state of freshwater bodies. RF patent No. 2050128 dated 20.12.1995. (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 05.03.2022; принята к публикации / accepted: 23.05.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

д-р хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник

e-mail: gfrumin@mail.ru

Терещенко Оксана Викторовна

старший преподаватель кафедры экологии, географии и природопользования

e-mail: otereschenko@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher

Tereshchenko, Oksana

Senior Lecturer, Department of Ecology, Geography, and Natural Resource Management

УДК 504.05

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ЧАСТИЦ МИКРОПЛАСТИКА В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ

Е. В. Иванова*, **Д. А. Тихонова**

*Институт озероведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105), *spb.spt@mail.ru*

Представлены результаты исследования содержания микропластика в поверхностном слое водной толщи и в донных отложениях Ладожского озера. Отбор проб, их подготовка и анализ проводились в период 2018–2021 гг. Для подготовки проб донных отложений использовалась модифицированная многостадийная методика NOAA, включающая плотностное отделение частиц микропластика от минеральной составляющей и пероксидное окисление органического вещества. Для идентификации формы, размера и цвета частиц микропластика использовался оптический микроскоп. Химический анализ исследуемых частиц проводился при помощи метода рамановской спектроскопии. Частицы микропластика присутствовали во всех исследованных пробах воды и донных отложений. Наиболее высокое его содержание зафиксировано вблизи городских поселений (Приозерск и Сортавала) и промышленных территорий (целлюлозный завод в городе Питкяранта). Также повышенное содержание микропластика наблюдается в местах впадения некоторых рек (Вуокса, Янисйоки). Среди обнаруженных частиц микропластика по форме в значительной степени преобладают волокна (98 %). Диапазон анализируемых частиц – 60–5000 мкм. Наибольшее количество частиц микропластика зафиксировано в диапазоне от 60 до 1000 мкм (61 %). Далее количество частиц уменьшается с увеличением их размера. Не обнаружено статистически значимой корреляции между гранулометрическим составом донных отложений и концентрациями микропластиковых частиц в исследуемых грунтах. Спектральный анализ химического состава частиц показал, что наиболее часто встречающимся типом микропластика в Ладожском озере является полиэтилен-терефталат, а также были обнаружены частицы полиакрилатов, полипропилена и полиэтилена.

Ключевые слова: загрязнение микропластиком; Ладога; пресноводные объекты; донные отложения; поверхностный слой водной толщи

Для цитирования: Иванова Е. В., Тихонова Д. А. Оценка содержания частиц микропластика в Ладожском озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 58–67. doi: 10.17076/lim1582

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № FMNG-2019-0003 «Разработка комплексных методов исследования и оценки характеристик твердых частиц в наномасштабном диапазоне размеров в водных объектах с различной степенью антропогенной нагрузки».

E. V. Ivanova*, D. A. Tikhonova. ESTIMATION OF MICROPLASTIC CONTENT IN LAKE LADOGA

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), *spb.spt@mail.ru*

This paper presents the results of a study on microplastics content variation in the surface layer of the water column and in the sediments of Lake Ladoga. The sampling, processing and analysis were carried out in 2018–2021. The modified NOAA method involving density separation of microplastics from mineral matter and peroxide oxidation of organic matter was applied to extract microplastics from sediment samples. An optical microscope was used to identify the shape, size, and colour of microplastic particles. The chemical analysis of the particles was carried out using Raman spectroscopy. Microplastic particles were detected in all the samples examined. The highest content of microplastics was observed near urban areas (Priozersk and Sortavala), industrial areas (pulp mill in Pitkyaranta), and at the inflow of two rivers (the Vuoksi, the Jänisjoki). Speaking of shape, fibers prevailed (98 %). The size range of the particles was 60–5000 µm. The most abundant size fraction of microplastic particles was 60–1000 µm (61 %), the numbers of particles decreased with increasing of their size. No statistically significant correlation was found between the particle-size composition of sediments and the abundance of microplastic particles in these sediments. Spectral analysis of the chemical composition of the particles showed that the most common type of microplastics in Lake Ladoga was polyethylene terephthalate; other types were polyacrylate, polypropylene, and polyethylene.

Keywords: microplastic pollution; Ladoga; freshwater bodies; sediments; surface layer of the water column

For citation: Ivanova E. V., Tikhonova D. A. Estimation of microplastic content in Lake Ladoga. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 58–67. doi: 10.17076/lim1582

Funding. The study was carried out under state assignment to the Institute of Limnology RAS – St. Petersburg Research Centre RAS within theme #FMNG-2019-0003 “Development of integrated methods for the study and assessment of the characteristics of solid particles in the nano scale size range in waters exposed to different degrees of anthropogenic pressure”.

Введение

В связи с глобальным ростом производства пластика, его повсеместным использованием и зачастую неправильной утилизацией большое количество пластиковых предметов оказывается в окружающей среде. В естественных условиях пластик не разлагается, а распадается на мелкие фрагменты. В водные объекты микропластик попадает с поверхностным стоком, с хозяйственно-бытовыми стоками, со сточными водами промышленных и водоочистных сооружений, в результате активного рекреационного использования территорий, а также рыболовства (деградации рыболовных сетей и других орудий лова) [Andrady, 2011].

В последние годы активно развиваются исследования в области оценки загрязнения водных объектов микропластиком. В Российской Федерации исследования проводятся на таких озерах, как Ладожское [Ivanova et al., 2021], Онежское [Zobkov et al., 2020; Zobkov

и др., 2021], Байкал [Karnaukhov et al., 2020; Ильина и др., 2021], на сибирских озерах [Malygina et al., 2021], на реках – Енисей, Обь, Томь [Frank et al., 2021a, b], Волга [Lisina et al., 2021], в Финском заливе [Pozdnyakov et al., 2020], Балтийском море [Zobkov et al., 2017; Есюкова, Чубаренко, 2019], заливе Петра Великого (Японское море) [Блиновская, Якименко, 2018], арктических морях [Ershova et al., 2021; Ершова и др., 2021] и других водных объектах.

Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН проводит исследования содержания частиц микропластика в Ладожском озере с 2018 года. Целью исследований является определение уровня загрязнения донных отложений и поверхностного слоя воды Ладожского озера микропластиком. Ладожское озеро имеет большое значение для хозяйственной деятельности Ленинградской области и Республики Карелия. Экологическое состояние Ладоги оказывает прямое влияние на качество водоснабжения

Санкт-Петербурга. Озеро является крупнейшим источником водных, пищевых и рекреационных ресурсов региона [Ладожское..., 2015]. Важность исследований микропластика в водных объектах определяется его потенциальной опасностью для живых существ. Многочисленные исследования подтверждают, что частицы пластика могут передаваться по пищевым цепям и негативно влиять на жизнедеятельность организмов [De Sá et al., 2018; Campanale et al., 2020; Yuan et al., 2022].

Материалы и методы

Отбор проб

Пробы воды и донных отложений отбирались в 2018–2021 годах с борта научно-исследовательских судов «Эколог» и «Посейдон». Отобрано по две пробы донных отложений в 24 точках (7 точек в июне 2018 г., 12 – в сентябре 2019 г., 3 – в октябре 2020 г. и 2 – в июне 2021 г.) и по две пробы поверхностного слоя воды в 15 точках (11 точек в октябре 2020 г., 3 – в июне 2021 г. и 1 – в октябре 2021 г.).

Пробы воды отбирались с поверхностного слоя с помощью специальной фильтрационной установки, разработанной в Институте озераведения [Поздняков и др., 2021]. Фильтрационная установка позволяет проводить отбор проб воды с различных глубин при помощи насоса. От 100 до 1000 литров воды (в зависимости от количества взвеси и планктона) прокачивалось через металлическую сетку с ячейкой 60 мкм. Объем воды фиксировался при помощи электронного счетчика.

Пробы донных отложений отбирались дночерпателем Экмана – Берджа с поверхностного слоя грунта толщиной 5–10 см, после чего при помощи металлической ложки помещались в стеклянные банки и хранились в холодильнике до этапа пробообработки.

Методы обработки проб

Пробы воды. Для растворения органической взвеси пробы воды смывались с сетки в стеклянную колбу, куда добавлялся реактив Фентона (30% раствор перекиси водорода и Fe(II) катализатор, приготовленный по методу NOAA [Masura et al., 2015]). Далее пробы выдерживались на водяной бане при температуре 75 °С в течение 40–60 минут в зависимости от количества органического материала, после чего отстаивались в течение суток. После растворения органического материала пробы фильтровались на металлическую сетку

с размером ячеек 60 мкм. Полученный осадок смывался дистиллированной водой на чашку Петри, чашка накрывалась металлической сеткой и оставлялась при комнатной температуре до полного испарения жидкости, после чего пробы анализировались под микроскопом. Если проба визуально содержала небольшое количество органического материала, она сразу смывалась с сетки на чашку Петри, высушивалась описанным выше способом и затем анализировалась под микроскопом. Для каждой станции отбора было проанализировано по две пробы воды и среднее значение между двумя пробами фиксировалось как результат для данной точки.

Пробы донных отложений. Гранулометрический состав проб донных отложений определялся по методу Качинского [1958]. Полученные результаты сопоставлялись с результатами проводимых ранее исследований, представленных на карте распределения донных отложений Ладожского озера [Ладожское..., 2015].

Для подготовки проб донных отложений к анализу использовалась методика NOAA [Masura et al., 2015]. В методику были внесены некоторые изменения: в частности, вместо раствора NaCl (1,2 г/см³) для отстаивания отложений использовался раствор ZnCl₂ в связи с его более высокой плотностью (1,7 г/см³). Данный раствор считается более эффективным для экстракции частиц микропластика с большей плотностью [Sorrock et al., 2017]. Также для фильтрации использовалась сетка с мелкой ячейкой (60 мкм) для возможности удержания более мелких частиц.

Перед отстаиванием пробы подсушивались в сушильном шкафу при температуре 55 °С для удаления излишней влаги. После чего 10 г исследуемой пробы высушивались при температуре 105 °С для определения абсолютно сухого веса и последующего пересчета содержания частиц микропластика на сухой вес. Подсушенная проба (400 г) дважды отстаивалась в 55% растворе ZnCl₂ в течение суток. Далее профильтровывалась вся надосадочная жидкость, как предложено в других работах [Zobkov, Esiukova, 2017]. Жидкость фильтровалась через металлическую сетку с размером ячеек 60 мкм. Осажденный на сетке материал смывался дистиллированной водой в колбу и смешивался в пропорциях 1:1 с реактивом Фентона для растворения органического материала. Проба выдерживалась на водяной бане при 75 °С в течение 40–60 минут в зависимости от количества органического материала, после чего отстаивалась в течение суток

по аналогии с исследованием микропластика в Балтийском море [Zobkov, Esiukova, 2017]. Далее проба снова фильтровалась через металлическую сетку с ячейкой 60 мкм. Осадок с сетки смывался раствором NaCl в стеклянный стакан, после чего разливался по пробиркам для повторного плотностного отделения в центрифуге. Центрифугирование проводилось в течение 3 минут на скорости 3000 оборотов в минуту. После центрифугирования надосадочная жидкость повторно фильтровалась через металлическую сетку, осажденные на сетке частицы тщательно промывались дистиллированной водой для удаления остатков соли и смывались на чашку Петри. Чашка накрывалась металлической сеткой и оставлялась при комнатной температуре до полного испарения жидкости. Для каждой станции отбора также было проанализировано по две пробы донных отложений, и среднее значение между двумя пробами фиксировалось как результат для данной точки.

Идентификация частиц микропластика

Идентификация частиц микропластика выполнялась в два этапа. На первом этапе проводился визуальный анализ частиц в диапазоне от 60 до 5000 мкм при помощи оптического микроскопа Euler Professor 770T с увеличением 40x и 100x для определения формы, размера и цвета частиц. Нижняя граница 60 мкм в определяемом размере частиц обусловлена размером сетки-фильтра. Частицы размером 60–100 мкм анализировались при увеличении 100x. Частицы размером более 100 мкм в основном анализировались при увеличении 40x. Для визуального определения микропластика использовались общепринятые критерии: отсутствие клеточной структуры, единообразная толщина и цвет частиц [Guide..., 2015].

После предварительной идентификации на оптическом микроскопе проводился анализ химического состава частиц с помощью рамановского спектрометра Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800. Для идентификации состава частиц использовалась библиотека Horiba JY Raman Library FORENSIC V2. Результат принимался при совпадении спектров от 70 %. Анализ проводился для наиболее подходящих по размеру частиц – крупных волокон и фрагментов.

Контроль внешнего загрязнения

Для предотвращения внешнего загрязнения при лабораторной подготовке проб по возможности исключалось применение пластиковых

предметов и синтетических тканей. Анализы выполнялись в специальной одежде, перчатках, с использованием стеклянной посуды и металлических сеток. Перед началом анализа раствор ZnCl₂ дополнительно фильтровался, а посуда и фильтры тщательно промывались дистиллированной водой.

На этапе подготовки проб для анализа осуществлялся контроль внешнего загрязнения. Параллельно с основными пробами проводился анализ холостых проб (по одной холостой пробе для каждой двух проб, отобранных в одной точке). Для холостых проб воды использовалась дистиллированная вода, для холостых проб донных отложений – раствор ZnCl₂. Проба с дистиллированной водой / раствором ZnCl₂ обрабатывалась аналогично основным пробам. При анализе холостой пробы подсчитывались частицы, попадающие в образец в результате побочного загрязнения.

Статистический анализ

Для оценки значимости различий между содержанием микропластика в песчаных и илистых пробах использовался U-критерий Манна – Уитни. Расчеты проводились в программе Microsoft Excel 2016.

Результаты

Контроль внешнего загрязнения

Доля внешнего загрязнения составила 0–15 % от общего количества частиц микропластика в пробах. В холостых пробах в небольших количествах были найдены волокна. Процент побочной контаминации вычитался из полученного количества частиц микропластика в основных пробах.

В нескольких исследуемых пробах воды с разных точек отбора были обнаружены одинаковые синие и зеленые фрагменты, визуально идентифицированные как краска с научно-исследовательского судна. Данные частицы не учитывались при оценке содержания микропластика в пробах.

Содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи

В пробах воды, отобранных на акватории Ладожского озера, суммарно обнаружено 292 частицы микропластика. На рис. 1 представлены результаты анализа содержания микропластика в пробах из поверхностно-

го слоя водной толщи в частицах на м³. Наиболее высокие значения содержания микропластика зафиксированы в местах впадения некоторых рек (Янисйоки и Вуоксы) – 144 и 109 частиц/м³ и вблизи городских территорий (Приозерск) – 160 частиц/м³, а также возле завода в г. Питкяранта – 353 частицы/м³. Среднее содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи Ладожского озера – 83 ± 86 частиц/м³.

Содержание микропластика в донных отложениях

В пробах донных отложений Ладожского озера суммарно обнаружено 419 частиц микропластика. На рис. 2 представлены результаты анализа содержания частиц микропластика в частицах на кг сухого веса донных отложений. Наибольшее содержание микропластика обнаружено вблизи города Питкяранта (90 частиц/кг сухого веса) и вблизи шхерных районов северной части Ладожского озера (51–53 частиц/кг сухого веса). Наименьшее содержание наблюдается в юго-западной части озера (8–17 частиц/кг сухого веса) (рис. 2). Среднее содержание микропластика в донных отложениях Ладожского озера составило 30 ± 18 частиц/кг сухого веса.

В озере не наблюдается значимой корреляции между концентрациями частиц микропластика и гранулометрическим составом донных отложений (песок/ил). U-критерий Манна – Уитни подтвердил отсутствие значимых различий между выборками: U = 93,5 (U_{кр} = 34, уровень значимости 0,05). Средние концентрации в илистых отложениях составляют 38 ± 24, а в песках 25 ± 11 частиц/кг сухого веса. По всей видимости, в данном случае решающее значение оказывают другие факторы (течения и источники антропогенного загрязнения).

По форме частиц в воде и донных отложениях значительно преобладают волокна. По цвету волокон преобладают прозрачные, красные и синие нити, реже встречаются черные, зеленые и серые. Фрагменты и пленки встречаются крайне редко (рис. 3).

Количество частиц микропластика в воде и донных отложениях увеличивается с уменьшением их размера (рис. 4). Результаты исследования показывают, что наибольшее количество частиц (61 %) находится в диапазоне 60–1000 мкм.

Идентификация частиц по химическому составу проводилась преимущественно для



Рис. 1. Содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи Ладожского озера (частиц/м³)

Fig. 1. Content of microplastics in the surface layer of the water column in Lake Ladoga (particles/m³)

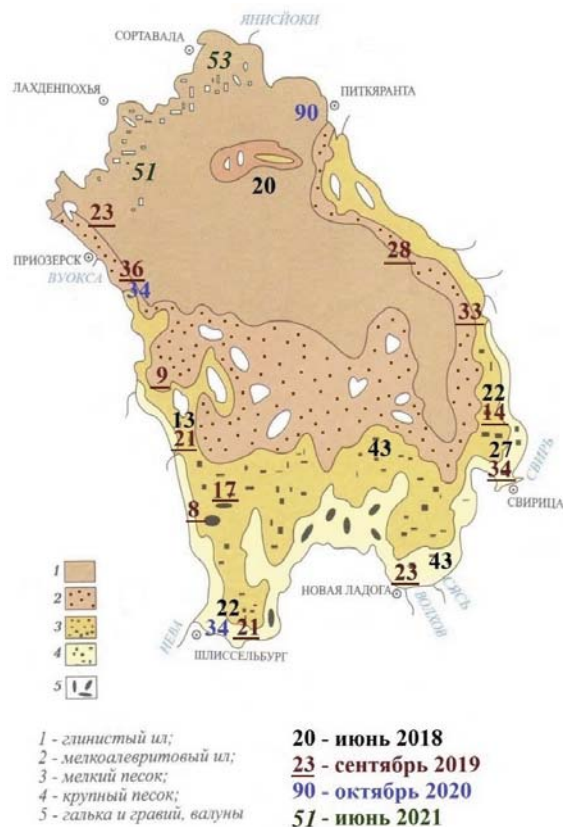


Рис. 2. Содержание микропластика в донных отложениях Ладожского озера (частиц/кг сухого веса)

Fig. 2. Content of microplastics in the sediments of Lake Ladoga (particles/kg dry weight)

более крупных частиц (> 500 мкм) в связи с определенными сложностями при анализе мелких нитей при помощи рамановской спектроскопии, в частности, прожигании лазером тонких волокон. Химический состав был верифицирован для 20 % от всех ис-

следуемых частиц пластика. Наиболее часто встречающимся типом пластика в Ладожском озере оказался полиэтилентерефталат (46 %). Также обнаружены частицы полиакрилатов (31 %), полипропилена (15 %) и полиэтилена (8 %).

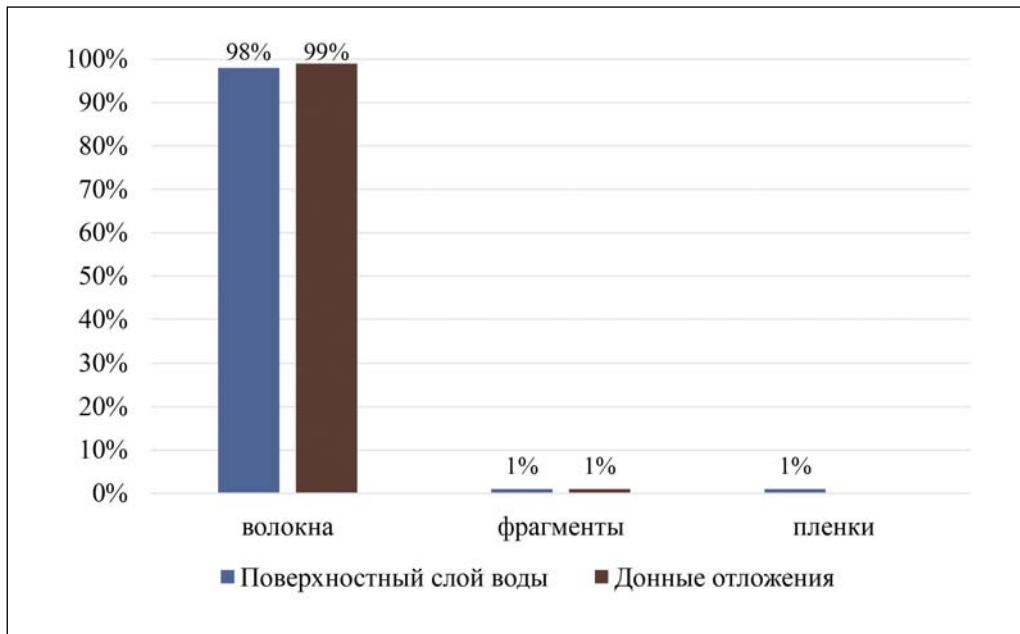


Рис. 3. Распределение микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера по форме частиц

Fig. 3. Distribution of microplastics in the water and sediments of Lake Ladoga by shape

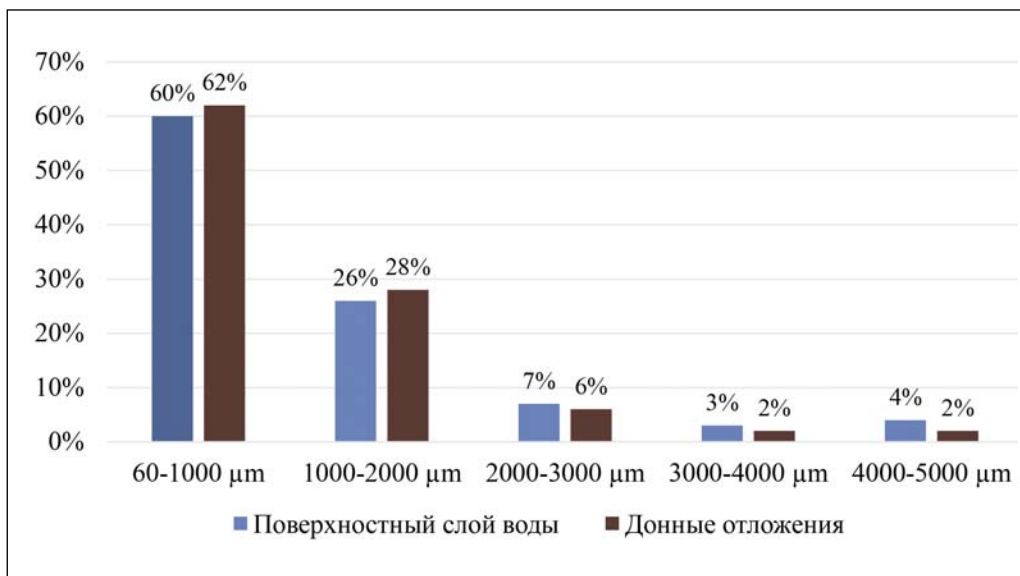


Рис. 4. Распределение частиц микропластика в воде и донных отложениях Ладожского озера по размеру

Fig. 4. Distribution of microplastics in Lake Ladoga by size

Обсуждение результатов

В настоящее время не существует утвержденной универсальной методики отбора и лабораторной подготовки проб воды и донных отложений для последующего анализа частиц микропластика, в связи с чем сравнение результатов исследований различных научных групп вызывает некоторые затруднения. Различаются методы отбора, пробоподготовки, размеры ячеей используемой фильтр-сетки, единицы измерения. Так, у сетей Манта и нейстонных сетей, используемых для отбора проб воды с судна, размер ячеей сетки обычно ≥ 300 мкм [Dusaucy et al., 2021]. Сети улавливают более крупные частицы, которые реже встречаются в водной толще. Однако они позволяют произвести отбор проб воды с обширной территории. Насосные системы в свою очередь удерживают более мелкие частицы за счет меньшего размера ячеей сетки [Tamminga et al., 2019; Karlsson et al., 2020]. Различные единицы измерения содержания частиц микропластика на объем воды (литр, м³, км³) и площадь (км²) также затрудняют сравнение полученных результатов.

В пробах воды, отобранных методом траления нейстонной сети на озере Байкал, зафиксировано значительно меньшее содержание частиц микропластика, чем в Ладожском озере (1 частица/м³) [Karnaukhov et al., 2020]. В озере Каллавеси в Финляндии среднее содержание частиц микропластика в пробах, отобранных сетями Манта, также значительно ниже полученного в Ладожском озере ($0,27 \pm 0,18$ частиц/м³), однако содержание микропластика в пробах, отобранных при помощи насосной системы (12 ± 17 частиц/м³ при размере ячеей сетки 100 мкм и 155 ± 73 частиц/м³ при размере ячеей сетки 20 мкм) [Urasjärvi et al., 2020], приближено к его содержанию в Ладоге. В обзоре исследований загрязнения микропластиком 98 мировых озер приводится диапазон значений содержания микропластика в поверхностном слое водной толщи – от 0,27 до 34 000 частиц/м³ с медианой в 1442 частицы/м³ [Dusaucy et al., 2021]. Таким образом, полученное содержание микропластика в воде может отличаться в зависимости от используемых методов его определения.

Методы лабораторной обработки проб донных отложений также имеют значительные отличия: различаются способы плотностного отделения частиц микропластика от минерального вещества (различны как растворы, так и оборудование), размеры сетки-фильтра (20–333 мкм), объем исследуемой пробы (50–400 г) и др.

Обзорное исследование содержания микропластика в озерах мира подтвердило ши-

рокий разброс полученных результатов по содержанию микропластика в донных отложениях – от 0,7 до 7707 частиц/кг с медианой в 385 частиц/кг [Dusaucy et al., 2021]. Широкий диапазон значений может быть связан как с различиями в используемых методиках обработки проб, так и с разницей в антропогенной нагрузке на водные объекты. В финском озере Весиярви содержание микропластика в донных отложениях выше, чем в Ладожском озере, – $395,5 \pm 90,7$ частиц/кг [Scopetani et al., 2019]. В Онежском озере, втором по величине в Европе после Ладожского, среднее содержание микропластика в донных отложениях также значительно выше полученного по Ладоге – $2188,7 \pm 1164,4$ частицы/кг сухого веса [Zobkov et al., 2020].

Установленные в Ладожском озере закономерности по преобладающей форме (волокна) и размерному распределению частиц микропластика (до 1000 мкм) соответствуют другим исследованиям в этой области [Zobkov et al., 2020; Acharya et al., 2021; Dusaucy et al., 2021].

Проведение совместных исследований нескольких научных групп по интеркалибрации методик отбора, подготовке и анализу проб для определения содержания частиц микропластика в дальнейшем даст возможность более точно сравнивать результаты исследований на разных водных объектах.

Заключение

В Ладожском озере частицы микропластика зафиксированы во всех исследуемых пробах воды и донных отложений. Наибольшее содержание микропластика в поверхностном слое водной толщи наблюдается вблизи урбанизированных территорий (города Приозерск и Сортавала) и промышленных объектов (комбинат в городе Питкяранта), а также в местах впадения некоторых рек (Вуокса и Янисйоки). Для донных отложений наибольшие значения зафиксированы вблизи города Питкяранта и шхерных районов северной части Ладожского озера.

Полученные результаты на данный момент не позволяют выявить четких закономерностей распределения микропластика в поверхностном слое водной толщи и донных отложениях Ладожского озера. Проведение многолетних работ на акватории позволит в дальнейшем лучше понять причины повышенного содержания частиц пластика в определенных областях, источники поступления, механизмы транспортировки микропластика и его трансформации в водных объектах.

ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН благодарит Ресурсный центр «Геомодель» СПбГУ за выполнение работ на рамановском спектрометре Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800.

Литература

Блиновская Я. Ю., Якименко А. Л. Анализ загрязнения акватории залива Петра Великого (Японского моря) микропластиком // Успехи современного естествознания. 2018. № 1. С. 68–73.

Ершова А. А., Еремина Т. Р., Дунаев А. Л., Makeeva И. Н., Татаренко Ю. А. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 2. С. 164–177. doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-164-177

Есюкова Е. Е., Чубаренко И. П. Микропластик в водной толще, донных осадках и песках пляжей юго-восточной части Балтийского моря: концентрации, распределение частиц по размерам и формам // Региональная экология. 2019. № 2(56). С. 16–29. doi: 10.30694/1026-5600-2019-2-16-29

Зобков М. Б., Чубаренко И. П., Есюкова Е. Е., Белкина Н. А., Ковалевский В. В., Зобкова М. В., Ефремова Т. А., Галахина Н. Е. Озера как аккумуляторы микропластика на его пути с суши в Мировой океан. Обзор исследований // Известия РГО. 2021. Т. 153, № 4. С. 1–19. doi: 10.31857/S0869607121040054

Ильина О. В., Колобов М. Ю., Ильинский В. В. Пластиковое загрязнение прибрежных поверхностных вод среднего и южного Байкала // Водные ресурсы. 2021. Vol. 48, no. 1. P. 42–51. doi: 10.31857/s0321059621010181

Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: АН СССР, 1958. 191 с.

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. СПб: Нестор-История, 2015. 200 с.

Поздняков Ш. Р., Каретников С. Г., Иванова Е. В., Тихонова Д. А., Лапенков А. Е., Гузева А. В. Опыт использования фильтрационной установки для изучения вертикального распределения микропластика в водной толще // Российский журнал прикладной экологии. 2021. № 4(28). С. 41–45. doi: 10.24852/2411-7374.2021.4.41.45

Acharya S., Rumi S. S., Hu Y., Abidi N. Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review // Text. Res. J. 2021. Vol. 91, no. 17–18. P. 2136–2156. doi: 10.1177/0040517521991244

Andrady A. L. Microplastics in the marine environment // Mar. Poll. Bull. 2011. Vol. 62, no. 8. P. 1596–1605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Campanale C., Massarelli C., Savino I., Locaputo V., Uricchio V. F. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. Vol. 17, no. 4. Art. 1212. doi: 10.3390/ijerph17041212

Coppock R. L., Cole M., Lindeque P. K., Queiros A. M., Galloway T. S. A small-scale, portable method for

extracting microplastics from marine sediments // Environ. Pollut. 2017. Vol. 230. P. 829–837. doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.017

De Sá L. C., Oliveira M., Ribeiro F., Rocha L. T., Futter M. N. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 645. P. 1029–1039. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.207

Dusaucy J., Gateuille D., Perrette Y., Naffrechoux E. Microplastic pollution of worldwide lakes // Environ. Pollut. 2021. Vol. 284. Art. 117075. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117075

Ershova A., Makeeva I., Malgina E., Sobolev N., Smolokurov A. Combining citizen and conventional basin for microplastics monitoring in the White Sea basin (Russian Arctic) // Mar. Poll. Bull. 2021. Vol. 173. Art. 112955. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112955

Frank Y. A., Vorobiev D. S., Kayler O. A., Vorobiev E. D., Kulinicheva K. S., Trifonov A. A., Hunter T. S. Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei river, Siberia – the pilot study results // Water (Switzerland). 2021a. Vol. 13, no. 22. Art. 3248. doi: 10.3390/w13223248

Frank Y. A., Vorobiev E. D., Vorobiev D. S., Trifonov A. A., Antsiferov D. V., Hunter T. S., Wilson S. P., Strezov V. Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia // Sustainability (Switzerland). 2021b. Vol. 13, no. 1. P. 1–14. doi: 10.3390/su13010080

Guide to microplastic identification // Marine & Environmental Research Institute. 2015. 13 p.

Ivanova E. V., Pozdnyakov Sh. R., Tikhonova D. A. Analysis of microplastic concentrations in water and bottom sediments as a new aspect of ecological monitoring // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 834, no. 1. Art. 012057. doi: 10.1088/1755-1315/834/1/012057

Karlsson T. M., Kärrman A., Rotander A., Hassellöv M. Comparison between manta trawl and in situ pump filtration methods, and guidance for visual identification of microplastics in surface waters // Environ. Sci. Pollut. Res. 2020. Vol. 27. P. 5559–5571. doi: 10.1007/s11356-019-07274-5

Karnaukhov D., Biritskaya S., Dolinskaya E., Teplykh M., Silenko N., Ermolaeva Y., Silow E. Pollution by macro-and microplastic of large lacustrine ecosystems in eastern Asia // Pollut. Res. 2020. Vol. 39, no. 2. P. 353–355.

Lisina A. A., Platonov M. M., Lomakov O. L., Sazonov A. A., Shishova T. V., Berkovich A. K., Frolova N. L. Microplastic Abundance in Volga River: Results of a pilot study in summer 2020 // Geogr. Environ. Sustain. 2021. Vol. 14, no. 3. P. 82–93. doi: 10.24057/2071-9388-2021-041

Malygina N., Mitrofanova E., Kuryatnikova N., Biryukov R., Zolotov D., Pershin D., Chernykh D. Microplastic Pollution in the surface waters from plain and mountainous lakes in Siberia, Russia // Water. 2021. Vol. 13, no. 16. Art. 2287. doi: 10.3390/w13162287

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 // NOAA Marine Debris Program. 2015. 31 p.

Pozdnyakov Sh. R., Ivanova E. V., Guzeva A. V., Shalunova E. P., Martinson K. D., Tikhonova D. A. Studying the concentration of microplastic particles in water, bottom sediments and subsoils in the coastal area of the Neva Bay, the Gulf of Finland // *Water Resources*. 2020. Vol. 47, no. 4. P. 599–607. doi: 10.1134/S0097807820040132

Scopetani C., Chelazzi D., Cincinelli A., Esterhuizen M. Assessment of microplastic pollution: occurrence and characterisation in Vesijärvi lake and Pikku Vesijärvi pond, Finland // *Environ. Monit. Assess.* 2019. Vol. 191, no. 11. Art. 652. doi: 10.1007/s10661-019-7843-z

Tamminga M., Stoewer S.-C., Fischer E. K. On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis // *Environ. Pollut.* 2019. Vol. 254. Art. 112970. doi: 10.1016/j.envpol.2019.112970

Uurasjärvi E., Hartikainen S., Setälä O., Lehtiniemi M., Koistinen A. Microplastic concentrations, size distribution, and polymer types in the surface waters of a northern European lake // *Water Environ. Res.* 2020. Vol. 92. P. 149–156. doi: 10.1002/wer.1229

Yuan Z., Rajat N., Cummins E. Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment – From marine to food systems // *Sci. Total Environ.* 2022. Vol. 823. Art. 153730. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153730

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: A journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. Vol. 8, no. 5. Art. 104367. doi: 10.1016/j.jece.2020.104367

Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results // *Marine Pollut. Bull.* 2017. Vol. 114, no. 2. P. 724–732. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.060

References

Acharya S., Rumi S. S., Hu Y., Abidi N. Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review. *Text. Res. J.* 2021;91(17-18): 2136–2156. doi: 10.1177/0040517521991244

Andrady A. L. Microplastics in the marine environment. *Mar. Poll. Bull.* 2011;62(8):1596–1605. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Blinovskaya Ya. Yu., Yakimenko A. L. The water area pollution analysis of Peter the Great Bay (Sea of Japan) by microplastic. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2018;1:68–73. (In Russ.)

Campanale C., Massarelli C., Savino I., Locaputo V., Uricchio V. F. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020;17(4):1212. doi: 10.3390/ijerph17041212

Coppock R. L., Cole M., Lindeque P. K., Queiros A. M., Galloway T. S. A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments. *En-*

viron. Pollut. 2017;230:829–837. doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.017

De Sá L. C., Oliveira M., Ribeiro F., Rocha L. T., Futter M. N. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Sci. Total Environ.* 2018;645:1029–1039. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.207

Dusaucy J., Gateuille D., Perrette Y., Naffrechoux E. Microplastic pollution of worldwide lakes. *Environ. Pollut.* 2021;284:117075. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117075

Ershova A. A., Eremina T. R., Dunayev A. L., Makeeva I. N., Tatarenko Y. A. Study of microplastic pollution in the seas of the Russian Arctic and the Far East. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(2):164–177. doi: 10.25283/2223-4594-2021-2-164-177 (In Russ.)

Ershova A., Makeeva I., Malgina E., Sobolev N., Smolokurov A. Combining citizen and conventional science for microplastics monitoring in the White Sea basin (Russian Arctic). *Mar. Poll. Bull.* 2021;173:112955. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112955

Esiukova E. E., Chubarenko I. P. Microplastics in the water column, bottom sediments, and beach sands of the southeastern Baltic Sea: Concentrations, particle distributions by size and shape. *Regional'naya ekologiya = Regional Ecology*. 2019;2(56):16–29. doi: 10.30694/1026-5600-2019-2-16-29 (In Russ.)

Frank Y. A., Vorobiev D. S., Kayler O. A., Vorobiev E. D., Kulinicheva K. S., Trifonov A. A., Hunter T. S. Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei river, Siberia – the pilot study results. *Water (Switzerland)*. 2021;13(22):3248. doi: 10.3390/w13223248

Frank Y. A., Vorobiev E. D., Vorobiev D. S., Trifonov A. A., Antsiferov D. V., Hunter T. S., Wilson S. P., Strezov V. Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom rivers in Siberia, Russia. *Sustainability (Switzerland)*. 2021;13(1):1–14. doi: 10.3390/su13010080

Guide to microplastic identification. Marine & Environmental Research Institute. 2015. 13 p.

Il'ina O. V., Kolobov M. Yu., Il'inskii V. V. Plastic pollution of the coastal surface water in the middle and southern Baikal. *Water Resources*. 2021;48(1):42–51. doi: 10.31857/s0321059621010181

Ivanova E. V., Pozdnyakov Sh. R., Tikhonova D. A. Analysis of microplastic concentrations in water and bottom sediments as a new aspect of ecological monitoring. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021;834(1):012057. doi: 10.1088/1755-1315/834/1/012057

Kachinski N. A. Mechanical and microaggregate composition of soil: Methods. AS USSR, Moscow; 1958. 191 p.

Karlsson T. M., Kärrman A., Rotander A., Hasse-llöv M. Comparison between manta trawl and in situ pump filtration methods, and guidance for visual identification of microplastics in surface waters. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. Vol. 27. P. 5559–5571. doi: 10.1007/s11356-019-07274-5

Karnaukhov D., Biritskaya S., Dolinskaya E., Teplykh M., Silenko N., Ermolaeva Y., Silow E. Pollution by

macro-and microplastic of large lacustrine ecosystems in eastern Asia. *Pollut. Res.* 2020;39(2):353–355.

Lisina A. A., Platonov M. M., Lomakov O. L., Sazonov A. A., Shishova T. V., Berkovich A. K., Frolova N. L. Microplastic abundance in Volga River: Results of a pilot study in summer 2020. *Geogr. Environ. Sustain.* 2021;14(3):82–93. doi: 10.24057/2071-9388-2021-041

Malygina N., Mitrofanova E., Kuryatnikova N., Biryukov R., Zolotov D., Pershin D., Chernykh D. Microplastic pollution in the surface waters from plain and mountainous lakes in Siberia, Russia. *Water.* 2021;13(16):2287. doi: 10.3390/w13162287

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. *NOAA Marine Debris Program.* 2015. 31 p.

Pozdnyakov Sh. R., Ivanova E. V., Guzeva A. V., Shalunova E. P., Martinson K. D., Tikhonova D. A. Studying the concentration of microplastic particles in water, bottom sediments and subsoils in the coastal area of the Neva Bay, the Gulf of Finland. *Water Resources.* 2020;47(4):599–607. doi: 10.1134/S0097807820040132

Pozdnyakov Sh. R., Karetnikov S. G., Ivanova E. V., Tikhonova D. A., Lapenkov A. E., Guzeva A. V. Experience of using a filtration device for studying vertical distribution of microplastics in water column. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology.* 2021;4(28):41–45. doi: 10.24852/2411-7374.2021.4.41.45 (In Russ.)

Rumyantsev V. A. (ed.). Lake Ladoga and the coastal remarkable sights. The Atlas. St. Petersburg: Nestor-Historia; 2015. 200 p. (In Russ.)

Scopetani C., Chelazzi D., Cincinelli A., Esterhuizen M. Assessment of microplastic pollution: Occurrence and characterisation in Vesijärvi lake and Pikku Vesijärvi pond, Finland. *Environ. Monit. Assess.* 2019;191(11):652. doi: 10.1007/s10661-019-7843-z

Tammaing M., Stoewer S.-C., Fischer E. K. On the representativeness of pump water samples versus manta sampling in microplastic analysis. *Environ. Pollut.* 2019;254:112970. doi: 10.1016/j.envpol.2019.112970

Uurasjärvi E., Hartikainen S., Setälä O., Lehtiniemi M., Koistinen A. Microplastic concentrations, size distribution, and polymer types in the surface waters of a northern European lake. *Water Environment Research.* 2020;92:149–156. doi: 10.1002/wer.1229

Yuan Z., Rajat N., Cummins E. Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment – From marine to food systems. *Sci. Total Environ.* 2022;823:153730. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153730

Zobkov M., Belkina N., Kovalevski V., Zobkova M., Efremova T., Galakhina N. Microplastic abundance and accumulation behavior in Lake Onego sediments: A journey from the river mouth to pelagic waters of the large boreal lake. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020;8(5):104367. doi: 10.1016/j.jece.2020.104367

Zobkov M. B., Chubarenko I. P., Esiukova E. E., Belkina N. A., Kovalevski V. V., Zobkova M. V., Efremova T. A., Galakhina N. E. Lakes as accumulators of microplastics on the way from land to the world ocean: A review. *Izvestiya RGS.* 2021;153(4):1–19. doi: 10.31857/S0869607121040054 (In Russ.)

Zobkov M., Esiukova E. Microplastics in Baltic bottom sediments: Quantification procedures and first results. *Mar. Poll. Bull.* 2017;114(2):724–732. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.10.060

Поступила в редакцию / received: 16.05.2022; принята к публикации / accepted: 02.09.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Иванова Екатерина Викторовна

канд. геогр. наук, научный сотрудник Лаборатории комплексных проблем лимнологии

e-mail: spb.spt@mail.ru

Тихонова Дарья Алексеевна

младший научный сотрудник Лаборатории комплексных проблем лимнологии

e-mail: tdasha94@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Ivanova, Ekaterina

Cand. Sci. (Geogr.), Researcher

Tikhonova, Daria

Junior Researcher

УДК 556.047

ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ ОТХОДЫ – НОВАЯ УГРОЗА ДЛЯ ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР

Г. Т. Фрумин

*Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
(наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186)*

В соответствии с Базельской конвенцией (1998 г.) фармацевтические отходы (медицинские отходы больниц, поликлиник и клиник, отходы производства и переработки фармацевтической продукции, фармацевтические товары, лекарства и препараты, которые не нашли сбыта или просрочены, отходы производства, получения и применения бицидов и фитофармацевтических препаратов) относятся к так называемому Желтому перечню и все без исключения определены как опасные. В статье проведен обзор результатов отечественных и зарубежных исследований, посвященных фармацевтическим отходам в водных объектах (реках и озерах) России и зарубежных стран. Лекарственные препараты являются неотъемлемой составляющей медицинской практики. Их применение обеспечивает сохранение здоровья населения и, как следствие, приводит к повышению качества и продолжительности жизни. С другой стороны, отходы фармацевтической промышленности все больше оказывают влияние на живую природу, так как неиспользованные лекарственные средства нередко выбрасываются или утилизируются ненадлежащим образом. В начале XXI в. Европейское агентство по окружающей среде (ЕЕА) обозначило влияние активных фармацевтических субстанций на окружающую среду как новую экологическую проблему. Приведена схема основных путей поступления лекарственных средств в окружающую среду. Отмечено, что в России отсутствует система предельно допустимых концентраций лекарственных средств в водных объектах. Цель исследования – разработка методики расчета предельно допустимых концентраций лекарственных средств в водных объектах, имеющих рыбохозяйственное значение. Установлено адекватное соотношение между величинами предельно допустимых концентраций вредных веществ в водных объектах, имеющих рыбохозяйственное значение (ПДК_{рх}), и средними летальными концентрациями для дафний. Для 12 лекарственных средств рассчитаны ориентировочные величины ПДК_{рх}.

Ключевые слова: фармацевтические отходы; лекарственное загрязнение вод; экотоксикология; негативное влияние на окружающую среду

Для цитирования: Фрумин Г. Т. Фармацевтические отходы – новая угроза для экосистем озер // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 68–75. doi: 10.17076/lim1597

G. T. Frumin. PHARMACEUTICAL WASTE – A NEW THREAT TO LAKE ECOSYSTEMS

Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Nab. R. Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia)

According to the Basel Convention (1998), pharmaceutical waste is waste from medical care in hospitals, medical centers and clinics, waste from the production and preparation of pharmaceutical products, waste pharmaceuticals, drugs and medicines, wastes from the production, formulation and use of biocides and phytopharmaceuticals. They belong to the so-called Yellow List, and are all, without exception, regarded hazardous. A review of the results of studies on pharmaceutical wastes in water bodies (rivers and lakes) in Russia and abroad has been produced. Medicines are an integral part of medical practice. They serve the preservation of the health of the population and, as a result, enhance the quality and prolong the duration of life. On the other hand, pharmaceutical industry waste is increasingly affecting wildlife, as unused medicines are often discarded or disposed of improperly. At the beginning of the 21st century, the European Environment Agency (EEA) designated the impact of active pharmaceutical ingredients on the environment as a new environmental problem. The main pathways by which drugs reach the environment have been charted. Meanwhile, Russia has no system to regulate maximum permissible concentrations of drugs in water bodies. The purpose of this study is to work out a methodology for calculating maximum permissible concentrations of drugs in water bodies of fishery importance. An adequate correlation has been established between maximum permissible concentrations of harmful substances in water bodies of fishery importance (MPC_f) and their average lethal concentrations for daphnia. Indicative MPC_f values have been calculated for 12 pharmaceutical products.

Keywords: pharmaceutical waste; pharmaceutical pollution of waters; ecotoxicology; negative environmental impact

For citation: Frumin G. T. Pharmaceutical waste – a new threat to lake ecosystems. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 68–75. doi: 10.17076/lim1597

Введение

В соответствии с Базельской конвенцией (1998 г.) фармацевтические отходы – это медицинские отходы больниц, поликлиник и клиник, отходы производства и переработки фармацевтической продукции, фармацевтические товары, лекарства и препараты, не нашедшие сбыта или просроченные, отходы производства, получения и применения биоцидов и фитофармацевтических препаратов. Они относятся к так называемому Желтому перечню и все без исключения определены как опасные [Эльхам, Романова, 2021].

В XXI веке производство фармацевтических препаратов (ФП) во всем мире достигло огромного масштаба, и уже по ближайшим прогнозам, их потребление составит 100 тыс. т в год [Kujawa-Roeleveld, 2011]. В середине 1990-х гг. во многих странах начались исследования по обнаружению лекарств в водной среде [Santos et al., 2010]. Основные источники загрязнения водной среды лекарствами: фармацевтическое производство, НИИ по разработке новых лекарств, медицинские

и аптечные учреждения, сельское хозяйство, ветеринария, население (рис.) [Кузнецов, 2004].

Более 80 видов фармацевтических препаратов и лекарственных метаболитов обнаружены в сточных и поверхностных водах в Австрии, Англии, Греции, Италии, Испании, Нидерландах, Германии, Хорватии, Швейцарии, Бразилии, Канаде [Колборн и др., 1996] (табл. 1 и 2). Фармацевтические препараты обнаружены в некоторых водных объектах России (табл. 3).

Как следует из данных, представленных в табл. 2 и 3, лекарственные средства обнаружены в озере Леман (Швейцария), в Ладожском озере, Суздальских озерах, в озере Безымянное (Россия). Лекарственные средства обнаружены в двух мелких озерах Китая (Lake Baiyangdian, Lake Taihu) [Liu et al., 2020], четырех озерах Финляндии (Lake Kuhnanto, Kareenkoski, Naarakoski Rapids, Lake Päijänne) [Lindholm-Lehto et al., 2016] и пяти Великих озерах (Great Lakes) в восточной части Северной Америки (пресноводные озера Верхнее, Мичиган, Гурон, Эри и Онтарио) [Blair, 2013].

Таблица 2. Некоторые классы лекарственных средств, обнаруженные в поверхностных водах [Служба..., 2013]

Table 2. Some classes of drugs found in surface waters [BIO Intelligence..., 2013]

Класс ЛС Classes of drugs	Лекарственное средство Drugs	Концентрация, нг/л Concentration, ng/l	Место и страна обнаружения Place and country of detection	ПНЕС, нг/л PNEC, ng/l
Антибиотики Antibiotics	Амоксициллин Amoxicillin	250	Река Тафф, Великобритания River Taff, Great Britain	16
	Кларитромицин Clarithromycin	50–950	Реки Германии Rivers of Germany	200
	Офлоксацин Ofloxacin	60	Река около г. Сиены, Италия River around Siena, Italy	115
	Ципрофлоксацин Ciprofloxacin	100	Озеро Леман, Швейцария Lake Lemman, Switzerland	50
	Эритромицин Erythromycin	100–500	Реки Германии Rivers of Germany	200
Бета-адреноблокаторы Beta blockers	Атенолол Atenolol	42	Река По, Италия River Po, Italy	100 000
	Метопролол Metoprolol	250–1000	Реки Германии Rivers of Germany	3200
	Пропранолол Propranolol	0–200	Реки Германии Rivers of Germany	100
Гиполипидемические препараты Lipid-lowering drugs	Безафибрат Bezafibrate	100–300	Реки Германии Rivers of Germany	1200
Нестероидные противовоспалительные средства Non-steroidal anti-inflammatory drugs	Парацетамол Paracetamol	1400	Река Тафф, Великобритания River Taff, Great Britain	1000
	Ибупрофен Ibuprofen	40–800	Реки Великобритании Rivers of Great Britain	5000
	Диклофенак Diclofenac	200–500	Реки Германии Rivers of Germany	100
Противоэпилептические средства Antiepileptic drugs	Карбамазепин Carbamazepine	500–1500	Реки Германии Rivers of Germany	2500

Примечание. ПНЕС – прогнозируемые значения концентраций фармполлютантов в водной среде, не оказывающих негативного воздействия на гидробионтов (русский аналог ПДК).

Note. PNEC – predicted values of pharmaceutical pollutants concentrations in the aquatic environment having no negative impact on aquatic organisms (Russian equivalent of MPC).

Большое количество фармацевтических препаратов содержится в сточных водах, как правило, в очень низких концентрациях (ниже 1 мкг/л). Многие из этих соединений не удаляются при очистке сточных вод.

«Если разделять лекарственные средства и их активные ингредиенты – фармацевтические субстанции, оказывается, что в городе с населением порядка трех миллионов человек выбрасывается около 1000 тонн неиспользованных лекарств, что соответствует примерно 150 условным тоннам содержащихся активных начал. Дополнительно сопоставимая с этим масса неизмененных активных начал, выделяемых организмом человека

после приема лекарств, может превосходить 150 условных тонн. Нестероидное противовоспалительное средство диклофенак в концентрациях 0,5–1,0 мкг/л, т. е. сравнимых со встречающимися в ряде поверхностных водоемов, вызывало на 21–28-й день испытаний цитологические изменения в почках, печени и жабрах форелевых рыб» [Козырев и др., 2012].

«Загрязнение лекарственными средствами водоемов влечет большое количество проблем. Аккумуляция фармполлютантов в экосистемах и их продолжительное воздействие на живые организмы может сопровождаться развитием раковых клеток и нарушением функций

Таблица 3. Концентрации обнаруженных лекарственных веществ в природных водоемах [Новикова и др., 2018]

Table 3. Concentrations of detected medicinal substances in natural water bodies [Novikova et al., 2018]

Точка отбора проб Sampling site	Концентрация, нг/дм ³ Concentration, ng/dm ³			
	Кофеин Caffeine	Кетопрофен Ketoprofen	Диклофенак Diclofenac	Ципрофлоксацин Ciprofloxacin
Монастырская бухта Ладожского оз., Валаам Monastery Bay, Lake Ladoga, Valaam	45–92 29–38 3,8–31	9 16–66 <3,2	47–60 <1,6 16–41	19–31 <1,6 <1,6
Суздальские озера (пляж) Suzdal lakes (beach)	43–323 13	<3,2 0,25	<1,6 10	<1,6 -
Сестрорецкий Разлив Sestroretsky lowland	65–446 <3,2	<3,2 <3,2	<1,6 <1,6	<1,6 <1,6
р. Дудерговка R. Dudergovka	75–192	40–123	<1,6	<1,6
оз. Безымянное (Красное Село, пляж) Lake Bezumyannoye (Krasnoye Selo, beach)	55–106 38	<3,2 <3,2	<1,6 <1,6	<1,6 <1,6
Финский залив (Кронштадт, пляж) The Gulf of Finland (Kronstadt, beach)	37	<3,2 <3,2	<1,6	<1,6

работы почек у млекопитающих, снижением репродуктивной функции у рыб и другими патологическими изменениями» [Lalumera et al., 2004; Calisto, Esteves, 2009].

Особую обеспокоенность вызывают опасные фармацевтические отходы, в составе которых есть цитотоксические препараты, антибиотики, липидоснижающие агенты, препараты с гормональным, психотропным и наркотическим действием и другие физиологически активные вещества. Отдельными исследованиями показано, что для некоторых из них характерны замедленные процессы биодеградации в окружающей среде [Тельцова, Гайсин, 2017; Воронина и др., 2018].

В 2004 году до 86 % всех самцов рыб, выловленных в 51 городе Великобритании, оказались гермафродитами. Основная причина таких мутаций – повышенное содержание в воде рек этинилэстрадиола, входящего в состав гормональных контрацептивов.

В статье [Новикова и др., 2018] приведено следующее: «Сложность разработки методического сопровождения контроля лекарственных средств в первую очередь связана с отсутствием утвержденных величин ПДК лекарственных средств».

Цель исследования – разработка методики расчета предельно допустимых концентраций лекарственных средств в водных объектах, имеющих рыбохозяйственное значение.

Материалы и методы

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. Дафниевый тест обязателен при установлении ПДК_{рх} отдельных веществ в воде рыбохозяйственных водоемов ПДК_{рх}. Обработка первичных данных, приведенных в работах отечественных и зарубежных авторов, позволила выявить статистически значимое соотношение между предельно допустимыми концентрациями металлов и органических соединений и средними летальными концентрациями для *Daphnia magna* при экспозиции 48 часов:

$$\ln \text{ПДК}_{\text{рх}} = -3,625 + 0,95 \ln \text{ЛК}_{50}$$

$$n = 34; r = 0,85; r^2 = 0,73; \sigma_{y(x)} = 1,94; F_p/F_T = 20,5.$$

Здесь n – количество химических соединений, r – коэффициент корреляции, r^2 – коэффициент детерминации, $\sigma_{y(x)}$ – стандартная ошибка, F_p/F_T – отношение расчетного значения критерия Фишера к табличному при уровне значимости 95 %.

Согласно шкале Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002], приведенное значение коэффициента корреляции ($r = 0,85$) свидетельствует о высокой тесноте связи между $\ln \text{ПДК}_{\text{рх}}$ и $\ln \text{ЛК}_{50}$. Кроме того, математическая модель адекватна

($F_p > F_T$) и может быть использована для предсказания $ПДК_{рх}$, так как $F_p/F_T > 4$ [Дрейпер, Смит, 1986].

По вышеприведенной формуле были рассчитаны величины $ПДК_{рх}$ для некоторых лекарственных средств (табл. 4).

Рассчитанные величины $ПДК_{рх}$ можно использовать для оценки уровней загрязненности лекарственными средствами различными водными объектами (водоемов и водотоков). Резуль-

таты прогнозов величин $ПДК_{рх}$ следует рассматривать как ориентировочные.

Результаты и обсуждение

Для иллюстрации предлагаемого подхода к оценке загрязненности водных объектов рассчитаны отношения максимальных концентраций лекарственных средств ($C_{лс}$) в поверхностных водах к рассчитанным $ПДК_{рх}$ (табл. 5).

Таблица 4. Предельно допустимые концентрации лекарственных средств для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение

Table 4. Maximum permissible concentrations of medicinal products for water in water bodies of fishery importance

Лекарственное средство Drug	$ЛК_{50}^{48}$ (дафнии), мг/л LC_{50}^{48} (daphnia), mg/l	$ПДК_{рх}$, мг/л MPC_r , mg/l
Кофеин Caffeine	182	3,7
Офлоксацин Ofloxacin	17,41	0,40
Атенолол Atenolol	33,4	0,75
Метапролол Metaprolol	8,8	0,21
Ибупрофен Ibuprofen	9,1	0,22
Парацетамол Paracetamol	9,2	0,22
Аспирин Aspirin	141	2,93
Соталол Sotalol	300	6,01
Омепразол Omeprazole	88	1,87
Эритромицин Erythromycin	0,94	0,025
Диклофенак Diclofenac	22,4	0,51
Ципрофлоксацин Ciprofloxacin	60	1,30

Таблица 5. Загрязненность водных объектов лекарственными средствами

Table 5. Water bodies contamination with drugs

Лекарственное средство Drug	Количество проб Number of samples	Концентрация, $C_{лс}$, мг/л Concentration, $C_{лс}$, mg/l	$C_{лс}/ПДК_{рх}$ $C_{лс}/MPC_r$
Аспирин Aspirin	508	$20,96 \cdot 10^{-3}$	0,007
Диклофенак Diclofenac	14 034	$18,74 \cdot 10^{-3}$	0,037
Офлоксацин Ofloxacin	1520	$17,70 \cdot 10^{-3}$	0,044
Парацетамол Paracetamol	1884	$230 \cdot 10^{-3}$	1,050
Ибупрофен Ibuprofen	13 900	$303 \cdot 10^{-3}$	1,377
Ципрофлоксацин Ciprofloxacin	1344	$6500 \cdot 10^{-3}$	5,000

Выводы

1. Интенсивное производство и применение лекарственных средств приводит к их попаданию в окружающую среду, и в первую очередь в водные объекты.

2. Гидрохимический мониторинг водных объектов РФ необходимо дополнить регулярным определением концентраций наиболее опасных фармацевтических препаратов и их метаболитов.

Литература

Воронина Л. П., Поздняков С. А., Балагур Л. А., Кеслер К. Э. Проблема классификации фармацевтических отходов и подходы к решению // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 12–2. С. 340–345. doi: 10.17513/mjrfi.12572

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

Колборн Т., Думаноски Д., Майерс Д. П. Наше украденное будущее: угрожаем ли мы нашей плодovitости, интеллекту и выживанию? Научный детектив. Нью-Йорк: Даттон, 1996. 306 с.

Козырев С. В., Кораблев В. В., Якуцени П. П. Новый фактор экологического риска: лекарственные вещества в окружающей среде и питьевой воде // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 4. С. 195–201.

Кузнецов Д. А. Экологические аспекты деятельности фармацевтических организаций // Мат-лы 4-й межрег. науч.-практ. конф. «Фармация 21-го века» (Новосибирск, 25 июня 2004 г.). Новосибирск: НГАУ, 2004. С. 14–17.

Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

Новикова Ю. А., Маркова О. Л., Фридман К. Б. Основные направления минимизации рисков здоровью населения, обусловленных загрязнением поверхностных источников питьевого водоснабжения лекарственными средствами // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97(12). С. 1166–1170. doi: 10.47470/0016-9900-2018-97-12-1166-1170

Тельцова Л. З., Гайсин Л. В. Экологическая оценка влияния медицинских отходов на окружающую среду // Молодой ученый. 2017. № 18. С. 129–132.

Эльхам Э. А., Романова Т. А. Влияние фармацевтических отходов на окружающую среду и проблемы обращения с ними // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6(108), ч. 2. С. 15–17. doi: 10.23670/IRJ.2021.108.6.034

BIO Intelligence Service. Study on the environmental risks of medicinal products, Final Report prepared for Executive Agency for Health and Consum. 2013. 310 p.

Blair B. D., Crago J. P., Hedman C. J., Klapner R. D. Pharmaceuticals and personal care products found in the Great Lakes above concentrations of environmental concern // Chemosphere. 2013. Vol. 93, iss. 9. P. 2116–2123. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.057

Calisto V., Esteves V. Psychiatric pharmaceutical in the environment // Chemosphere. 2009. Vol. 77. P. 1257–1274. doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.09.021

Kujawa-Roeleveld K. Training material. Pharmaceutical compounds in environment. Removal of pharmaceuticals from concentrated wastewater streams in source-oriented sanitation? // Sustainable Water Management in the City of the Future. 2011. P. 1–69.

Lalumera G. M., Calamari D., Galli P., Castiglioni S., Crosa G., Fanelli R. Preliminary investigation on the environmental occurrence and effects of antibiotics used in aquaculture in Italy // Chemosphere. 2004. Vol. 54. P. 661–668. doi: 10.1016/j.chemosphere.2003.08.001

Liu N., Jin X., Yan Zh., Luo Y., Feng Ch., Fu Zh., Tang Zh., Wu F., Giesy J. P. Occurrence and multiple-level ecological risk assessment of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in two shallow lakes of China // Environ. Sci. Eur. 2020. Vol. 32(69). P. 4–10. doi: 10.1186/s12302-020-00346-1

Lindholm-Lehto P. C., Ahkola H. S. J., Knuutinen J. S., Herve S. H. Widespread occurrence and seasonal variation of pharmaceuticals in surface waters and municipal wastewater treatment plants in central Finland // Environ. Sci. Pollut. Res. 2016. Vol. 23. P. 7985–7997. doi: 10.1007/s11356-015-5997-y

Santos L., Araujo A., Fachini A., Pena A., Delerue-Matos C., Montenegro M. C. B. S. M. Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment // J. of Hazardous Materials. 2010. Vol. 175. P. 45–95. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.10.100

References

BIO Intelligence Service. Study on the environmental risks of medicinal products, Final Report prepared for Executive Agency for Health and Consum. 2013. 310 p.

Blair B. D., Crago J. P., Hedman C. J., Klapner R. D. Pharmaceuticals and personal care products found in the Great Lakes above concentrations of environmental concern. Chemosphere. 2013;93(9):2116–2123. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.057

Calisto V., Esteves V. Psychiatric pharmaceutical in the environment. Chemosphere. 2009;77:1257–1274. doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.09.021

Draper N., Smith H. Applied regression analysis. Moscow: Finansy i statistika; 1986. 366 p. (In Russ.)

El'kham E. A., Romanova T. A. The impact of pharmaceutical waste on the environment and problems of their management. Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal. 2021;6(108):15–17. doi: 10.23670/IRJ.2021.108.6.034 (In Russ.)

Kolborn T., Dumanoski D., Maiers D. P. Our stolen future: Are we threatening our fertility, intelligence, and survival? Science detective. New-York: Datton; 1996. 306 p.

Kozyrev S. V., Korablev V. V., Yakutseni P. P. A new environmental risk factor: Medicinal substances in the environment and drinking water. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie = St. Peters-

burg State Polytechnical University Journal. Science and Education. 2012;4:195–201. (In Russ.)

Kujawa-Roeleveld K. Training material. Pharmaceutical compounds in environment. Removal of pharmaceuticals from concentrated wastewater streams in source-oriented sanitation? *Sustainable Water Management in the City of the Future*. 2011:1–69.

Kuznetsov D. A. Environmental aspects of the activities of pharmaceutical organizations. *Farmatsiya 21-go veka: Mat-ly 4-i mezhhreg. nauch.-prakt. konf. (Novosibirsk, 25 iyunya 2004 g.) = Pharmacy of the 21st century: Proceed. 4th interregional scientific-practical conf. (Novosibirsk, June 25, 2004)*. Novosibirsk: NGAU; 2004. P. 14–17. (In Russ.)

Lalumera G. M., Calamari D., Galli P., Castiglioni S., Crosa G., Fanelli R. Preliminary investigation on the environmental occurrence and effects of antibiotics used in aquaculture in Italy. *Chemosphere*. 2004;54:661–668. doi: 10.1016/j.chemosphere.2003.08.001

Liu N., Jin X., Yan Zh., Luo Y., Feng Ch., Fu Zh., Tang Zh., Wu F., Giesy J. P. Occurrence and multiple-level ecological risk assessment of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in two shallow lakes of China. *Environ. Sci. Eur.* 2020;32(69):4–10. doi: 10.1186/s12302-020-00346-1

Lindholm-Lehto P. C., Ahkola H. S. J., Knuutinen J. S., Herve S. H. Widespread occurrence and seasonal variation of pharmaceuticals in surface waters and municipal

wastewater treatment plants in central Finland. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016;23:7985–7997. doi: 10.1007/s11356-015-5997-y

Makarova N. V., Trofimets V. Ya. Statistics in Excel. Moscow: Finansy i statistika; 2002. 368 p.

Novikova Yu. A., Markova O. L., Fridman K. B. The main directions of minimizing risks to public health caused by contamination of surface sources of drinking water supply with drugs. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2018;97(12):1166–1170. doi: 10.47470/0016-9900-2018-97-12-1166-1170 (In Russ.)

Santos L., Araujo A., Fachini A., Pena A., Delerue-Matos C., Montenegro M. C. B. S. M. Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment. *J. of Hazardous Materials*. 2010;175:45–95. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.10.100

Tel'tsova L. Z., Gaisin L. V. Environmental assessment of the impact of medical waste on the environment. *Molodoi uchenyi = The Young Scientist*. 2017;18:129–132. (In Russ.)

Voronina L. P., Pozdnyakov S. A., Balagur L. A., Kesler K. E. The problem of classification of pharmaceutical waste and approaches to the solution. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;12-2:340–345. doi: 10.17513/mjpf.12572 (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 23.05.2022; принята к публикации / accepted: 27.06.2022.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Фрумин Григорий Тевелевич

д-р хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник

e-mail: gfrumin@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Frumin, Grigory

Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher

УДК 556.114 : 639.312 (282.247.211)

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ФОРЕЛЕВЫХ ХОЗЯЙСТВ В КОНДОПОЖСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД 2022 ГОДА

Н. Е. Галахина*, М. Б. Зобков

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),

* kulakovanata@mail.ru

Проведены гидрохимические исследования в районе расположения форелевого хозяйства в Кондопожской губе Онежского озера в зимний период 2022 г. На глубоководной станции у садков в придонном горизонте отмечался дефицит растворенного кислорода (0,8 мг/л), высокое содержание ионов аммония (0,410 мг N/л) и минерального фосфора (787 мкг/л, или 97 % от $P_{\text{общ}}$), сопоставимое со сточными водами Кондопожского ЦБК. На других станциях, находящихся в районе форелевого хозяйства, и на К50, расположенной в зоне влияния сточных вод Кондопожского ЦБК, содержание растворенного кислорода изменялось в пределах от 6,8 до 13,1 мг/л, концентрации NH_4^+ (до 0,068 мг N/л) и $P_{\text{мин}}$ (до 51 мкг/л) были существенно ниже, чем у садков. Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии форелевых хозяйств на химический состав воды, что подтверждается ранее установленным в центральной части Кондопожской губы многолетним трендом увеличения содержания $P_{\text{общ}}$ и интенсивным развитием фитопланктона.

Ключевые слова: биогенные элементы; органическое вещество; эвтрофирование; дефицит кислорода

Для цитирования: Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Гидрохимические исследования в районе расположения форелевых хозяйств в Кондопожской губе Онежского озера в зимний период 2022 года // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 76–87. doi: 10.17076/lim1599

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН). Работа Н. Е. Галахиной выполнена при поддержке проекта РНФ (№ 22-17-00193).

N. E. Galakhina*, M. B. Zobkov. HYDROCHEMICAL STUDIES OF THE TROUT FARMING AREA IN KONDOPOGA BAY OF LAKE ONEGO IN THE WINTER OF 2022

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *kulakovanata@mail.ru

Hydrochemical studies of the trout farming area in Kondopoga Bay of Lake Onego were carried out in the winter of 2022. Surveys at the deep-water site near the cages revealed dissolved oxygen starvation (0.8 mg/l) and a high content of ammonium (0.410 mg N/l) and mineral phosphorus (787 µg P/l, or 97 % of total phosphorus) in the near bottom level, which is comparable to wastewater from the Kondopoga pulp-and-paper mill. At other sites located in the trout farming area and at K50 located in the zone affected by Kondopoga PPM wastewater, which spreads over the bottom of the bay in winter, the dissolved oxygen content varied from 6.8 to 13.1 mg/l, the concentrations of NH_4^+ (up to 0.068 mg N/l) and P_{min} (up to 51 µg P/l) were significantly lower than near the cages. Our data indicate the trout farms have a significant effect on the water chemical composition, confirmed by a previously detected long-term trend for an increase in TP content and intensive growth of phytoplankton in the central part of Kondopoga Bay.

Keywords: nutrients; organic matter; eutrophication; oxygen starvation

For citation: Galakhina N. E., Zobkov M. B. Hydrochemical studies of the trout farming area in Kondopoga Bay of Lake Onego in the winter of 2022. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 76–87. doi: 10.17076/lim1599

Funding. The study was financed from the Russian federal budget through government assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS). N. E. Galakhina's contribution was funded by the Russian Science Foundation grant #22-17-00193.

Введение

В настоящее время садковое форелеводство является одним из приоритетных направлений рыбохозяйственной деятельности на внутренних водоемах Европейского Севера [Кучко, Ильмаст, 2016]. Среди аквакультуры на территории РФ в последние годы наблюдается интенсивный рост производства товарной форели. Его объемы в 2019 г. составили 60,5 тыс. т, что на 69,5 % выше уровня 2015 г. [Мамонтов, 2021]. Лидером данной отрасли в России является Республика Карелия, на ее долю приходится не менее 80 % общего объема производства [Михайленко, Стерлигова, 2021]. По официальным данным [Государственный..., 2021], в 2020 г. на территории Карелии действовало 73 рыбоводных хозяйства, в которых было выращено 36,4 тыс. т разновозрастной рыбы, в том числе 26,5 т товарной рыбы, что выше по сравнению с 2018 г. на 11,1 и 18,8 % соответственно. Успешному развитию форелеводства в Карелии способствуют уникальные природные и благоприятные климатические условия региона: большое количество глубоководных водоемов с водой высокого качества, длительный световой период во время вегетации и оптимальный температурный режим [Кучко, Кучко, 2010; Стерлигова, Ильмаст, 2018; Миллячук и др., 2019]. Садковое форелеводство активно развивается в основном на внутренних водоемах региона, крупнейшими из которых являются Ладожское и Онежское озера. Около половины всех форелевых хозяйств Карелии

располагаются в бассейне Онежского озера [Литвинова и др., 2015], большая их часть находится в Кондопожской губе.

В то же время резкий рост объемов производства товарной продукции на водных объектах Российской Федерации может привести к ухудшению их экологического состояния. Потенциальные проблемы, которые могут возникнуть в результате функционирования форелевых хозяйств, многообразны: начиная от увеличения содержания биогенных элементов (БЭ) в воде [Kirkagac et al., 2009; Mazaheri Kohanestani et al., 2013; Varol, Balci, 2020] и, как следствие, роста первичной продукции до структурных преобразований в гидробиологических сообществах в результате трофических изменений [Sindilariua et al., 2009]. Одним из значимых аспектов влияния форелевых хозяйств на водную среду является ее загрязнение биогенными элементами, органическими и взвешенными веществами, основным источником которых являются корма (часть их остаются неиспользованными), а также продукты жизнедеятельности рыб [Fadaeifard et al., 2012; Астафьева, 2016]. Избыточное поступление биогенных элементов в водоемы способствует увеличению биомассы фитопланктона, и как следствие, происходит их «цветение», в результате чего качество воды ухудшается: снижается прозрачность, изменяется кислородный режим [Carpenter et al., 1998]. В результате функционирования форелевых хозяйств серьезные изменения могут происходить во всех гидробиологических сообществах – фитопланктоне,

зоопланктоне, бентосе и ихтиофауне водоемов [Рыжков и др., 2011, 2014; Васильева, Батурина, 2015; Милянчук и др., 2019]. Так, в некоторых озерах Карелии, испытывающих влияние форелевых хозяйств, увеличилась численность и биомасса фитопланктона [Рыжков и др., 2011; Теканова и др., 2019], в его составе отмечено высокое обилие нитчатых зеленых водорослей, указывающее на повышение трофности [Стерлигова и др., 2011], а также наличие синезеленых водорослей [Рыжков и др., 2011]. Помимо увеличения биомассы зоопланктона в его составе появились коловратки, являющиеся индикаторами повышенной трофности [Кучко, Кучко, 2010], биомасса бентоса возросла за счет менее чувствительных к воздействию антропогенных факторов хирономид, олигохет, моллюсков и бокоплавов [Павловский, 2014].

Таким образом, изучение химического состава воды в местах расположения форелевых хозяйств, источника загрязнения водных объектов и, как следствие, изменения их трофического статуса, является актуальной задачей в рамках контроля состояния водных ресурсов и нормирования антропогенного воздействия на них. Комплексные исследования, включающие в себя и гидрохимические, в районах расположения форелевых хозяйств на водоемах Карелии, в том числе и в Кондопожской губе Онежского озера, ранее проводили только в период открытой воды [Стерлигова и др., 2009, 2011, 2019; Рыжков и др., 2011; Теканова и др., 2019], зимних наблюдений не осуществляли. Поэтому целью данной работы являлось изучение гидрохимического режима Кондопожской губы Онежского озера в районе расположения форелевых хозяйств в зимний период, а также анализ его влияния на экологическое состояние озера, являющегося источником питьевого водоснабжения.

Исследование выполнено на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Материалы и методы

Кондопожская губа – один из крупнейших, глубоководных и изолированных заливов Онежского озера (площадь – 225 км², средняя и максимальная глубина – 21 и 75 м соответственно [Сабылина, 2015б], объем воды – 5,179 км³ и период водообмена – 1,02 года) [Лозовик и др., 2019]. Залив подвержен существенному антропогенному влиянию Кондопожского целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) с сульфитной

варкой целлюлозы, сточные воды которого сбрасываются в его вершинную часть [Сабылина, 2015а; Galakhina et al., 2022], в 2019–2020 гг. их объем в среднем составил около 47 млн м³/год [Государственный..., 2020, 2021]. Кроме того, залив принимает речные воды третьего по величине стока притока озера – р. Суны со среднегодовым расходом 2,3 км³/год [Балаганский и др., 2015]. Речные и сточные воды являются основными источниками поступления органического вещества (ОВ) и БЭ в Кондопожскую губу Онежского озера [Сабылина и др., 2010; Лозовик и др., 2016; Galakhina et al., 2022]. Помимо этого, в заливе располагается 11 форелевых хозяйств из 14 находящихся на акватории озера, все они сосредоточены в основном в центральной его части и являются дополнительным источником ОВ и БЭ [Galakhina et al., 2022].

Зимние гидрохимические исследования проводились в период ледостава в марте и апреле 2022 г. в центральной части Кондопожской губы Онежского озера. Пробы воды отбирались со льда в районе расположения садков форелевых хозяйств (ст. KF1, KF2, KF3) и на ст. K50, находящейся на трассе распространения сточных вод ЦБК вдоль разреза Кондопожской губы. Станция K50 располагается на расстоянии 3,76 км от ближайшей к садкам ст. KF2 (рис. 1). Садки форелевых хозяйств расположены в шхере (фиорде), отделенной от основной части Кондопожской губы островом Соколий. Рельеф дна в районе расположения садков представляет собой впадину, сформированную с юго-западного края прибрежным склоном, а с юго-восточного – склоном о. Соколий. Фиорд вытянут в северо-западном направлении, что характерно для этого района Онежского озера [Беляев и др., 2021]. Станция KF2 расположена в точке максимального понижения рельефа (глубина 35 м), в то время как ст. KF1 и KF3 расположены на краях этой локальной депрессии, где глубины составляют 23 и 18 м соответственно. На глубоководной ст. KF2 пробы отбирали дважды с интервалом в месяц с четырех горизонтов – 1,0; 15,0; 25,0 м и придонного, на остальных – однократно и только из поверхностного и придонного горизонтов.

В пробах воды определяли физико-химические параметры (рН, электропроводность, взвешенное вещество), газовый состав (СО₂, О₂), содержание ОВ (С_{орг}, ПО, ХПК, БПК₅, цветность) и БЭ (Р_{мин}, Р_{общ}, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, N_{общ}). Химические анализы выполнены по стандартным методикам в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН, качество их выполнения подтверждено хорошей

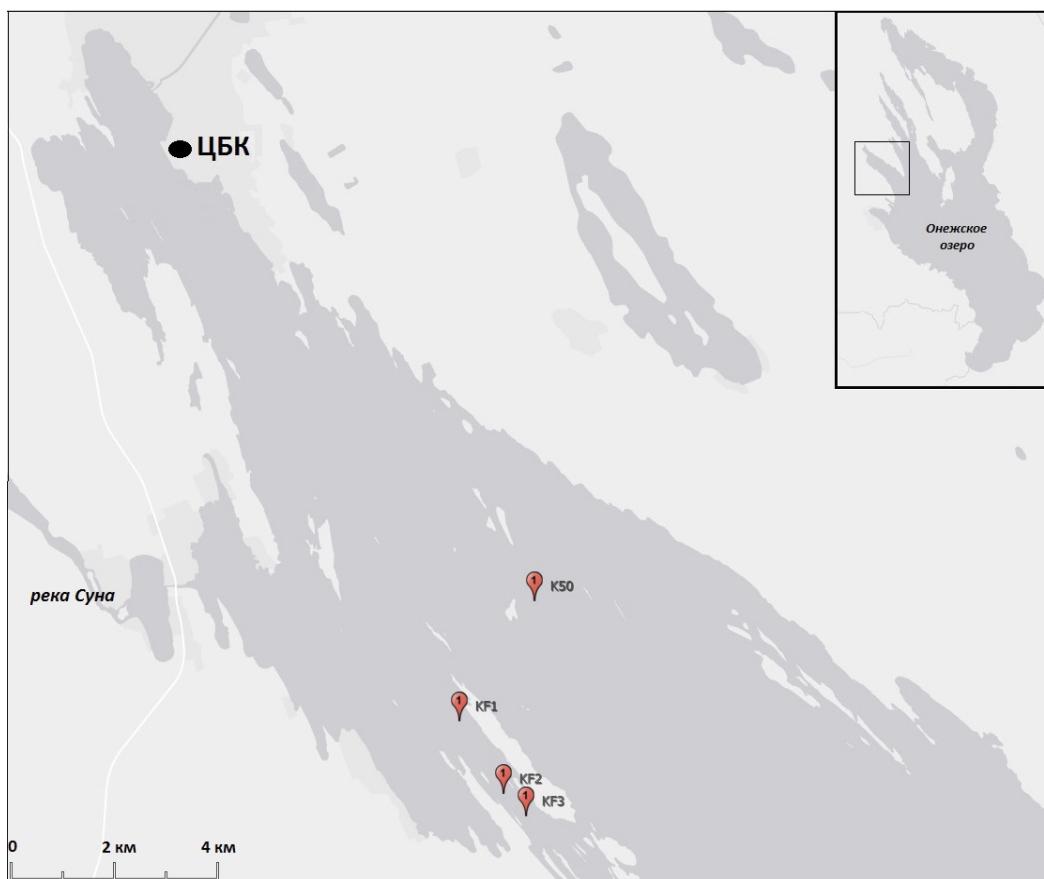


Рис. 1. Карта-схема района исследования
 Fig. 1. Schematic map of the research area

сходимостью данных в рамках международного лабораторного сличения ICP Waters [Intercomparison..., 2016]. Статистический анализ данных выполнен с использованием программного обеспечения SOFA Statistics (www.sofastatistics.com).

Результаты и обсуждение

Зимой 2022 г. химические показатели воды на глубине до 15 м на трех станциях в районе расположения форелевого хозяйства были близки (табл.). Содержание $C_{\text{орг}}$ в среднем составило 8,3 мг/л, $P_{\text{мин}}$ – 8 мкг/л, $P_{\text{общ}}$ – 16 мкг/л, NH_4^+ – 0,044 мг N/л, что согласуется с данными, полученными ранее для центральной части Кондопожской губы [Zobkov et al., 2022]. Насыщение воды кислородом изменялось в пределах от 10,6 до 13,5 мг/л, а концентрация CO_2 – от 1,9 до 4,4 мг/л, при этом минимальное содержание кислорода и максимальный уровень CO_2 отмечены в апреле на ст. KF2 на глубине 15 м. В придонном слое наблюдалось увеличение содержания взвешенных веществ, CO_2 , $C_{\text{орг}}$ и косвенных показателей содержания O_2 ,

общего фосфора за счет минеральных его форм, ионов аммония и органических форм азота, при этом снижалось насыщение воды кислородом.

Из всех станций в районе расположения форелевого хозяйства выделялась глубоководная ст. KF2, находящаяся рядом с садками. Здесь наблюдался дефицит кислорода, его содержание в апреле составило 0,8 мг/л, что существенно ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов (4,0 мг/л) (рис. 2). Уменьшение содержания кислорода в придонных слоях воды обусловлено окислением O_2 , накопленного в донных осадках за время функционирования форелевого хозяйства [Christensen et al., 2000; Kirkagac et al., 2009]. Содержание $C_{\text{орг}}$ в воде на ст. KF2 постепенно увеличивалось от поверхности до 25,0 м, а на придонном горизонте – снижалось (рис. 2), по всей видимости, за счет его окисления. Такая же закономерность отмечалась и для косвенных показателей содержания O_2 . На других исследованных станциях концентрация O_2 была выше у дна (рис. 2). При этом на ст. KF1 и KF2 содержание $C_{\text{орг}}$ было сопоставимо, тогда как в придонном слое воды на ст. KF3 оно было ниже.

Химический состав воды в центральной части Кондопожской губы Онежского озера зимой 2022 г.
Chemical composition of water in the central part of the Kondopoga Bay of Lake Onego in the winter of 2022

Показатель, единицы определения Parameters, units	Станции отбора проб Sampling stations			
	KF1	KF2	KF3	K50
pH	7,2/6,6	<u>7,3/6,6</u> 7,2/6,6	7,3/6,8	7,3/6,9
Электропроводность, мкСм/см Conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$	52,3/57,7	<u>53,6/62,4</u> 51,5/67,2	52,5/50,3	52,9/52,9
Взвешенное вещество, мг/л TSS, mg/L	0,6/0,8	<u><0,5/0,6</u> 1,0/6,1	0,6/0,9	<0,5/<0,5
Растворенный O_2 , мг/л Dissolved O_2 , mg/L	12,7/6,8	<u>13,2/2,3</u> 12,4/0,8	12,5/9,9	13,1/10,3
CO_2 , мг/л CO_2 , mg/L	2,3/8,4	<u>2,0/11,6</u> 2,5/17,4	2,3/5,5	1,9/4,7
$\text{C}_{\text{орг}}$, мг/л TOC, mg/L	7,9/14,4	<u>8,2/13,8</u> 7,5/12,2	7,1/10,1	7,9/12,3
Цветность, мг Pt-Co/л Color, mg Pt-Co/L	46/73	<u>38/66</u> 42/175	35/55	35/54
ПО, мг O/л COD_{Mn} , mg O/L	10,4/25,4	<u>10,4/21,8</u> 9,2/19,8	7,8/13,4	8,2/16,2
ХПК, мг O/л COD_{Cr} , mg O/L	24,7/47,1	<u>22,6/37,1</u> 23,2/42,1	20,8/30,5	22,2/33,2
БПК ₅ , мг O ₂ /л BOD_5 , mg O ₂ /L	2,0/1,1	<u>0,7/0,7</u> 1,1/1,3	0,9/1,6	0,7/1,5
$\text{P}_{\text{мин}}$, мкг/л $\text{PO}_4\text{-P}$, $\mu\text{g P/L}$	5/51	<u>7/381</u> 6/787	5/17	5/23
$\text{P}_{\text{общ}}$, мкг/л TP, $\mu\text{g P/L}$	20/69	<u>12/392</u> 16/810	16/31	9/36
$\text{NH}_4\text{-N}$, мг N/л $\text{NH}_4\text{-N}$, mg N/L	0,026/0,068	<u>0,132/0,400</u> 0,019/0,410	0,039/0,064	0,016/0,035
$\text{NO}_2\text{-N}$, мг N/л $\text{NO}_2\text{-N}$, mg N/L	0,001/0,001	<u><0,001/0,003</u> 0,001/0,007	<0,001/0,002	0,001/0,001
$\text{NO}_3\text{-N}$, мг N/л $\text{NO}_3\text{-N}$, mg N/L	0,18/0,19	<u>0,222/0,054</u> 0,180/0,028	0,20/0,17	0,17/0,14
$\text{N}_{\text{орг}}$, мг N/л TON, mg/L	0,24/0,27	<u>0,07/0,62</u> 0,19/2,77	0,15/0,18	0,20/0,22
$\text{N}_{\text{общ}}$, мг N/л TN, mg/L	0,45/0,53	<u>0,42/1,08</u> 0,39/3,21	0,39/0,41	0,39/0,39

Примечание. Приведены значения на поверхностном и придонном горизонтах, для ст. KF2 – в числителе данные за март, в знаменателе – за апрель 2022 г.

Note. The values on the surface and bottom levels are given, at KF2 st. data for March is given in the numerator, for April 2022 – in the denominator.

Содержание ионов аммония, минерального и общего фосфора на ст. KF1, KF2 и KF3 закономерно увеличивалось ко дну (рис. 3). Максимальная их концентрация наблюдалась на придонном горизонте ст. KF2 в апреле: $\text{P}_{\text{мин}}$ – 787 мкг/л, $\text{P}_{\text{общ}}$ – 810 мкг/л, NH_4^+ – 0,410 мг N/л (рис. 3), при этом фосфор был представлен преимущественно минеральными формами (до 97 % у дна). Распределение форм БЭ в локальной депрессии в районе расположения форелевых хозяйств показывает, что загрязненные воды расположены на глубине 20 м и ниже (рис. 3). Вертикальное распределение O_2 , CO_2 и $\text{C}_{\text{орг}}$ также подтверждает аккумуляцию загрязненных вод в придонном слое воды на глубинах ниже 20 м (рис. 2).

С марта по апрель 2022 г. на глубоководной ст. KF2, особенно в придонном горизонте, наблюдалось снижение насыщения воды кислородом (с 16 до 6 % насыщ.), увеличивались значения БПК₅ (с 0,7 до 1,3 мг O₂/л), ХПК (с 37,1 до 42,1 мг O/л), а также содержание CO₂ (с 11,6 до 17,4 мг/л), $\text{P}_{\text{мин}}$ (с 381 до 787 мкг/л), $\text{P}_{\text{общ}}$ (с 392 до 810 мкг/л) и $\text{N}_{\text{общ}}$ (с 1,08 до 3,21 мг N/л) за счет увеличения $\text{N}_{\text{орг}}$ (с 0,62 до 2,77 мг N/л), тогда как концентрация ионов аммония практически не изменилась (0,400 мг N/л в марте и 0,410 мг N/л в апреле). Увеличение этих показателей в период ледостава говорит о постепенном накоплении загрязняющих веществ в придонных слоях воды в месте расположения форелевых хозяйств.

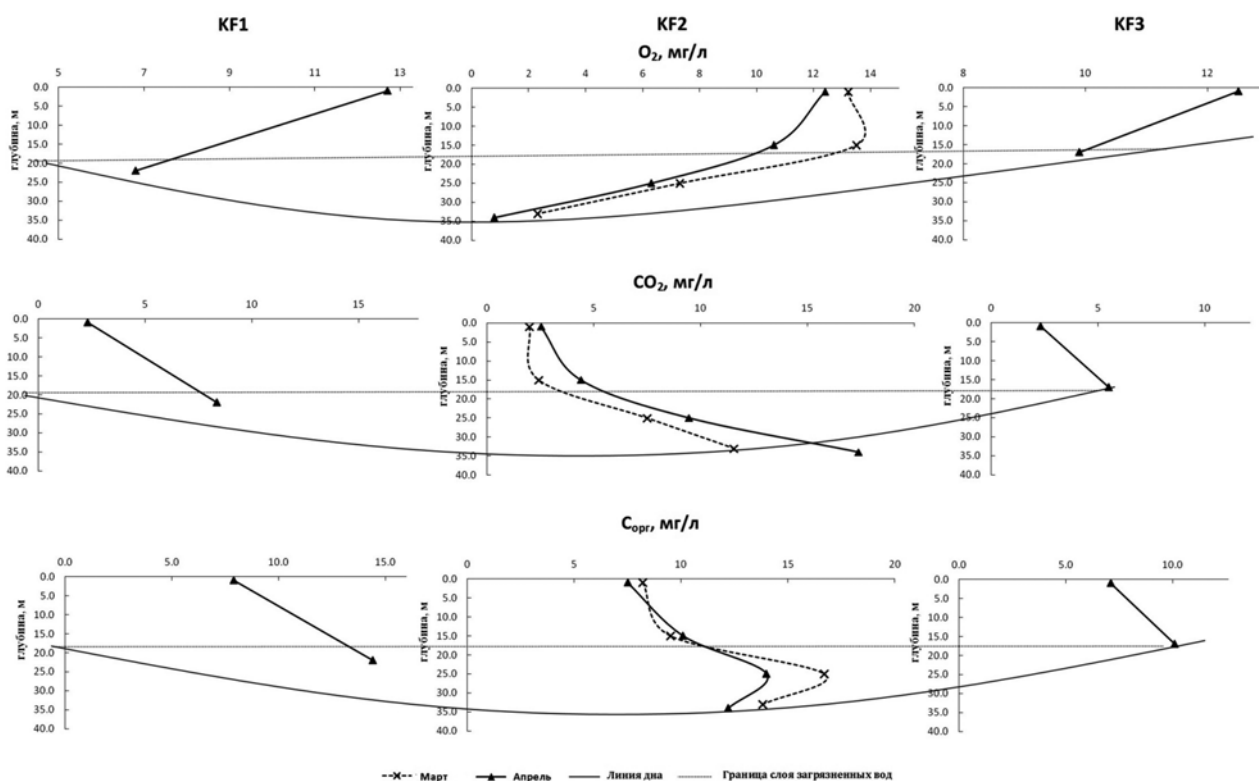


Рис. 2. Содержание O_2 , CO_2 и $C_{орг}$ в воде в районе расположения форелевого хозяйства в Кондопожской губе Онежского озера зимой 2022 г.

Fig. 2. The O_2 , CO_2 and TOC content in the water of the trout farm area in the Kondopoga Bay of Lake Onego in the winter of 2022

Исследования в месте расположения форелевых хозяйств проводились одновременно с измерениями на ст. К50, подверженной влиянию сточных вод Кондопожского ЦБК, что позволяет провести сравнение химического состава воды этих двух районов. Аналогично результатам, полученным для зоны влияния форелевых хозяйств, на ст. К50 содержание OB , ионов аммония и фосфора было выше в придонном слое воды. На этом участке Кондопожской губы повышенные значения данных показателей связаны с влиянием сточных вод Кондопожского ЦБК [Galakhina et al., 2022], которые в зимний период распространяются в придонных слоях воды [Зобкова, Галахина, 2019; Galakhina et al., 2022]. При этом содержание OB и $BЭ$ на ст. К50 было ниже по сравнению со ст. KF1 и KF2 и сопоставимо со ст. KF3, за исключением меньшей концентрации ионов аммония (табл.).

Кроме того, проведено сравнение полученных результатов с ранее опубликованными данными качества воды в исследуемом районе в период открытой воды [Zobkov et al., 2022]. С использованием U критерия Манна – Уитни выполнено сопоставление химического со-

става воды на ст. KF2 на глубине выше и ниже 15 м. Выявлено, что в зимний период вода на глубине выше 15 м достоверно отличается от периода открытой воды меньшим содержанием $P_{общ}$ и взвешенных веществ, а ниже 15 м – большими концентрациями $C_{орг}$ и $N_{орг}$, а также более высокими значениями некоторых косвенных показателей содержания OB ($XПК$, $ПО$, цветность) ($p < 0,05$). Несмотря на то что в придонном слое глубоководной ст. KF2 статистически достоверной разницы в концентрации общего фосфора и ионов аммония по сравнению с периодом открытой воды не выявлено из-за небольшого числа измерений, зимой их значения были экстремально высокими (810 мкг/л и 0,410 мг N/л соответственно). Наблюдаемый уровень загрязнения придонных вод $BЭ$ в районе расположения форелевых хозяйств сопоставим со сточными водами Кондопожского ЦБК, в которых содержание $P_{мин}$ составляет 300 мкг/л, $P_{общ}$ – 700 мкг/л, а NH_4^+ – 0,360 мг N/л [Galakhina et al., 2022]. При этом непосредственно в озере, в районе выпуска сточных вод комбината, эти показатели существенно ниже по сравнению с местом расположения форелевых хозяйств. Так, зимой 2021 г. в придонном слое

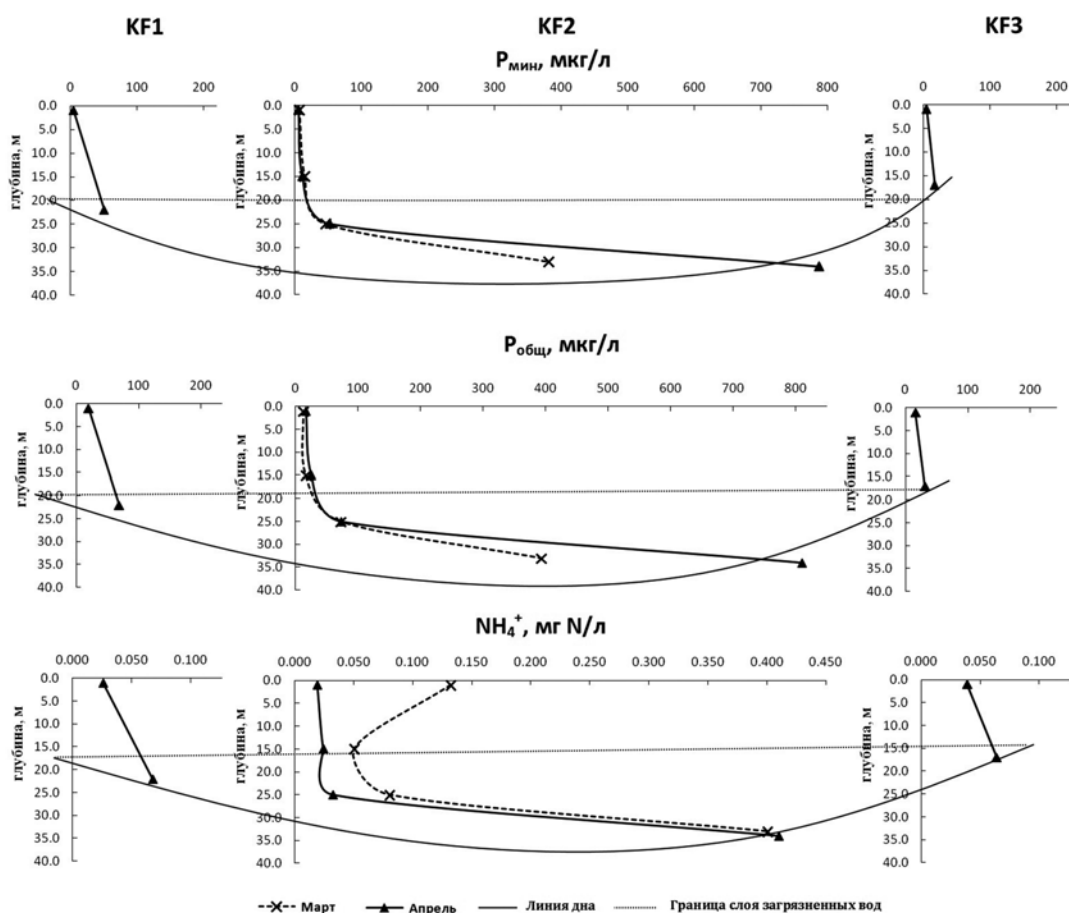


Рис. 3. Содержание $P_{\text{мин}}$, $P_{\text{общ}}$ и NH_4^+ в воде в районе расположения форелевого хозяйства в Кондопожской губе Онежского озера зимой 2022 г.

Fig. 3. The $PO_4\text{-P}$, TP and $NH_4\text{-N}$ content in the water of the trout farm area in the Kondopoga Bay of Lake Onego in the winter of 2022

воды, где распространяются сточные воды в это время года, содержание $P_{\text{мин}}$ составляло 16 мкг/л, $P_{\text{общ}}$ – 40 мкг/л, а NH_4^+ – 0,113 мг N/л [Zobkov et al., 2022].

Ранее [Galakhina et al., 2022] было установлено, что химический состав воды в Кондопожской губе вблизи форелевых хозяйств существенно отличается по содержанию взвешенного вещества, ионов аммония и фосфора общего от химического состава воды в центральной глубоководной части Онежского озера, где концентрация $P_{\text{мин}}$ не превышает 2 мкг/л, $P_{\text{общ}}$ и NH_4^+ в среднем составляют 8 мкг/л и 0,009 мг N/л соответственно [Galakhina et al., 2022; Zobkov et al., 2022], что также указывает на влияние форелевых хозяйств на содержание БЭ в воде. При этом главным фактором воздействия форелевых хозяйств на водные объекты является поступление минерального фосфора, содержание которого нормируется [Нормативы..., 2016], величина ПДК для рыбохозяйственных водоемов зависит от их трофи-

ческого статуса (для олиготрофных водоемов – 50 мкг/л, мезотрофных – 150 мкг/л, эвтрофных – 200 мкг/л). Если расчет кратности превышения ПДК по фосфатам в районе влияния форелевых хозяйств (ст. KF2) в Кондопожской губе проводить относительно Онежского озера, являющегося олиготрофным, то она составит 7,6 раза в марте и 15,7 раза в апреле, а если относительно мезотрофной Кондопожской губы (уже находящейся в антропогенно-изменном состоянии за счет воздействия ЦБК), то кратность превышения ПДК будет меньше – 2,5 и 5,2 раза соответственно. Однократное превышение ПДК по фосфатам наблюдалось и на ст. KF1. Таким образом, в зимний период в районе наблюдений превышены нормативы допустимого содержания фосфатов и существенно занижены по кислороду [Нормативы..., 2016], а также нарушены требования к гидрохимическому составу воды, предъявляемые к водоемам для выращивания форели [ОСТ 15.372-87]. Кроме того, существующий

норматив для минерального фосфора (фосфатов), равный 50 мкг/л, является явно превышенным для олиготрофных озер: если фоновая концентрация минерального фосфора в Онежском озере составляет около 2 мкг/л, то при увеличении его содержания до 50 мкг/л озеро необратимо перейдет в статус эвтрофного. Таким образом, существующая система нормирования влияния форелевых хозяйств на водные объекты является явно неэффективной и требует существенной доработки.

Результаты данного исследования, как и более ранних, свидетельствуют о существенном воздействии форелевых хозяйств на химический состав воды Кондопожской губы Онежского озера, которое усиливается в зимний период. Оно выражается в повышении в придонном слое воды концентрации минерального фосфора и ионов аммония, а также в дефиците кислорода по сравнению с периодом открытой воды [Galakhina et al., 2022]. Как видно из результатов двух гидрохимических съемок, проведенных с интервалом в один месяц, зимой в районе расположения форелевого хозяйства происходит постепенное накопление минеральных форм БЭ в придонных слоях воды, поступающих из донных отложений, за счет отсутствия ветрового перемешивания и ограниченного водообмена губы с открытой частью озера. Весной в результате прогрева водных масс и вертикального их перемешивания при переходе температуры через точку максимальной плотности (при прохождении термического бара), по-видимому, происходит залповый выброс БЭ в водный столб Кондопожской губы, приводящий к интенсивному цветению фитопланктона. Как установлено ранее [Теканова и др., 2019], зоны наиболее обильного развития фитопланктона в Кондопожской губе сосредоточены рядом с форелевыми хозяйствами, где численность и биомасса фитопланктона, а также концентрация хлорофилла *a* выше, чем в вершине залива, находящейся под прямым влиянием сточных вод ЦБК. В многолетнем аспекте (с 1992 г. по настоящее время) влияние форелевых хозяйств уже прослеживается по увеличению содержания $P_{\text{общ}}$ в центральной части Кондопожской губы, где и сосредоточены хозяйства [Galakhina et al., 2022]. Следует отметить, что первые признаки эвтрофирования наблюдаются также в пелагиали Онежского озера [Galakhina et al., 2022]. Таким образом, продолжение совместного действия двух мощных источников поступления биогенных элементов на акватории Онежского озера – Кондопожского ЦБК и форелевых хозяйств – может привести к дальнейшему эвтрофированию этого уникального водоема.

Заключение

Гидрохимические исследования, проведенные в зимний период 2022 г. в центральной части Кондопожской губы Онежского озера, позволили выявить ряд особенностей в химическом составе воды в районе расположения форелевых хозяйств. Зимой в придонных слоях воды происходит накопление минеральных форм биогенных элементов (ионов аммония и минерального фосфора). Разложение органического вещества, поступающего как из антропогенно-нарушенных донных осадков, так и непосредственно от форелевых хозяйств в зимний период, приводит к увеличению содержания CO_2 и уменьшению содержания кислорода в придонных слоях воды ниже допустимого для водоемов рыбохозяйственного значения уровня. При этом их загрязнение по таким показателям, как ионы аммония и минеральный фосфор, сопоставимо со сточными водами Кондопожского ЦБК. Накопление минеральных форм биогенных элементов в воде, наблюдающееся зимой, влечет интенсивное развитие фитопланктона в весенне-летний период и появление локальной зоны эвтрофирования в центральной части Кондопожской губы.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН за помощь в проведении полевых и аналитических работ.

Литература

- Астафьева С. С. Воздействие эксплуатации садковых рыбоводных комплексов на состояние окружающей среды в условиях Нижней Волги // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2016. № 1. С. 21–27.
- Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свироского водохранилища). Гидрологический режим. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных возможностях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.
- Беляев П. Ю., Рыбалко А. Е., Субетто Д. А., Зобков М. Б., Федоров Г. Б. Четвертичные отложения и рельеф Онежского озера // Географический вестник. 2021. №1(56). С. 6–16. doi: 10.17072/2079-7877-2021-6-16
- Васильева В. А., Батурина М. А. Состояние донной фауны Нювчимского водохранилища // Актуальные проблемы биологии и экологии: XXII Всерос. молодежн. науч. конф. Сыктывкар, 2015. С. 60–65.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 году. Петрозаводск, 2020. 248 с.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 году. Петрозаводск, 2021. 277 с.

Зобкова М. В., Галахина Н. Е. Содержание и распределение фенолсодержащих соединений в Онежском озере // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Мат-лы II Междунар. конф. (19–24 мая 2019 г.). Казань: АН РТ, 2019. Ч. 2. С. 88–93.

Кучко Т. Ю., Ильмаст Н. В. Садковое форелеводство Республики Карелия (современная ситуация и перспективы развития) // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2016. № 9. С. 8–13.

Кучко Я. А., Кучко Т. Ю. Сообщество зоопланктона Онежского озера в районах размещения форелевых хозяйств как индикатор качества воды // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 4. С. 9–12.

Литвинова И. А., Литвиненко А. В., Богданова М. С. Анализ водохозяйственного использования водосбора на основе ГИС-технологий // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 52–60.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lm303

Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 1. С. 94–102. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

Мамонтов И. Ю. Российское форелеводство и перспектива развития // Наука без границ. 2021. № 1. С. 55–59.

Милянчук Н. П., Ильмаст Н. В., Стерлигова О. П., Распутин Е. Н., Филатов И. В. Рыбное население Сямозера в районе форелевого хозяйства // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 11. С. 42–49. doi: 10.17076/eco1116

Михайленко В. Г., Стерлигова О. П. Некоторые экологические аспекты выращивания радужной форели // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 12. С. 82–90. doi: 10.17076/eco1509

Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (Утв. Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552)

ОСТ 15.372-87. Вода для рыбоводных хозяйств. Общие требования и нормы.

Павловский С. А. Сравнительная характеристика и многолетняя динамика макрозообентоса и основных биотопов экосистемы Сямозера (Южная Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. № 2. 2014. С. 140–146.

Рыжков Л. П., Дзюбук И. М., Горохов А. В., Марченко Л. П., Артемьева Н. В., Иешко Т. А., Рябинкина М. Г., Раднаева В. А. Состояние водной среды и биоты при функционировании садковых форелевых хозяйств // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 2. С. 239–247.

Рыжков Л. П., Онищенко И. Н., Онищенко Н. А., Шустов Ю. А. Особенности распределения аборигенных озерных рыб в зоне влияния форелевой фермы // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2. С. 23–29.

Сабылина А. В. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрохимические исследования. Внешняя нагрузка на озеро // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015а. С. 68–72.

Сабылина А. В. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрохимические исследования. Химический состав губ Онежского озера, подверженных антропогенному воздействию // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015б. С. 77–88.

Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.

Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В. Состояние и перспективы развития форелеводства в Республике Карелия // Рыбохозяйственные водоемы России: фундаментальные и прикладные исследования: Мат-лы II Всерос. науч. конф. с международным участием (Санкт-Петербург, 2–4 апреля 2018 г.). СПб., 2018. С. 591–595.

Стерлигова О. П., Китаев С. П., Ильмаст Н. В., Кучко Я. А., Павловский С. А., Савосин Е. С. Состояние Кефтьень-губы Онежского озера при товарном выращивании радужной форели // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: Мат-лы XXVIII Междунар. конф. (Петрозаводск, 5–8 октября 2009 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 523–528.

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 товарной форели // Поволжский экологический журнал. 2011. № 3. С. 386–393.

Теканова Е. В., Рыжаков А. В., Калинкина Н. М., Дмитриева Д. А., Фомина Ю. Ю., Макарова Е. М. Состояние экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Мат-лы II Междунар. конф. (19–24 мая 2019 г.). Казань: АН РТ, 2019. Ч. 1. С. 190–194.

Carpenter S. R., Caraco N. F., Correll D. L., Howarth R. W., Sharpley A. N., Smith V. H. Nonpoint

pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen // *Ecological Applications*. 1998. Vol. 8(3). P. 559–568.

Christensen P. B., Rysgaard S., Sloth N. P., Dalsgaard T., Schwaerter S. Sediment mineralization, nutrient fluxes, denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium in an estuarine fjord with sea cage trout farms // *Aquatic Microbial Ecology*. 2000. Vol. 21. P. 73–84.

Fadaeifard F., Raissy M., Faghani M., Majlesi A., Farahani G. N. Evaluation of physicochemical parameters of waste water from rainbow trout fish farms and their impacts on water quality of Koohrang stream – Iran // *International Journal of Fisheries and Aquaculture*. 2012. Vol. 4(8). P. 170–177. doi: 10.5897/IJFA12.007

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022. Vol. 17. Art. 100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn. Oslo (Norway): Norwegian Institute for Water Research. 2016. Report No. 7081 // *ICP Waters report 129/2016*. URL: <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2426546> (дата обращения: 10.05.2022).

Kirkagac M. U., Pulatsu S., Topcu A. Trout farm effluent effects on water sediment quality and benthos // *Clean Soil, Air, Water*. 2009. Vol. 37, no. 4–5. P. 386–391. doi: 10.1002/clen.200800212

Mazaheri Kohanestani Z., Ghorbani R., Hajimradloo A., Naeimi A., Fazel A. The effects of trout farm effluents on water quality parameters of Zaringol Stream (Golestan, Iran) using NSFQI and WQI Indexes // *Environmental Resources Research*. 2013. Vol. 1, no. 2. P. 191–202.

Sindilaria P.-D., Reiter R., Wedekind H. Impact of trout aquaculture on water quality and farm effluent treatment options // *Aquat. Living Resour.* 2009. Vol. 22. P. 93–103.

Varol M., Balci M. Characteristics of effluents from trout farms and their impact on water quality and benthic algal assemblages of the receiving stream // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266. Art. 115101. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115101

Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T., Efremenko N., Kulik N. Data on the chemical composition of Lake Onego water in 2019–2021. Data in Brief. 2022. Vol. 42. Art. 108079. doi: 10.1016/j.dib.2022.108079

References

Astaf'eva S. S. Impact of operation of cage fish-breeding complexes on the environment in the conditions of the Lower Volga. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK-produkty zdorovogo pitaniya = Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex-healthy food products*. 2016;1:21–27. (In Russ.)

Balaganskii A. F., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Salo Yu. A. Current state and change of the Lake Onego ecosystem (Verkhne-Svirsky Reservoir). *Hydrological*

regime. River flow resources and water balance. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozmozhnostyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 31–38. (In Russ.)

Belyaev P. Yu., Rybalko A. E., Subetto D. A., Zobkov M. B., Fyodorov G. B. Quaternary deposits and geomorphological features of Lake Onega. *Geograficheskii vestnik = Geographical Bulletin*. 2021;1(56):6–16. doi: 10.17072/2079-7877-2021-6-16 (In Russ.)

Carpenter S. R., Caraco N. F., Correll D. L., Howarth R. W., Sharpley A. N., Smith V. H. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*. 1998;8(3):559–568.

Christensen P. B., Rysgaard S., Sloth N. P., Dalsgaard T., Schwaerter S. Sediment mineralization, nutrient fluxes, denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium in an estuarine fjord with sea cage trout farms. *Aquatic Microbial Ecology*. 2000;21:73–84.

Fadaeifard F., Raissy M., Faghani M., Majlesi A., Farahani G. N. Evaluation of physicochemical parameters of waste water from rainbow trout fish farms and their impacts on water quality of Koohrang stream – Iran. *International Journal of Fisheries and Aquaculture*. 2012;4(8):170–177. doi: 10.5897/IJFA12.007

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Intercomparison 1630: pH, conductivity, alkalinity, NO₃-N, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na, K, TOC, Al, Fe, Mn, Cd, Pb, Cu, Ni and Zn. Oslo (Norway): Norwegian Institute for Water Research. Report No. 7081 – 2016. *ICP Waters report 129/2016*. URL: <https://niva.brage.unit.no/niva-xmlui/handle/11250/2426546> (accessed: 10.05.2022).

Kirkagac M. U., Pulatsu S., Topcu A. Trout farm effluent effects on water sediment quality and benthos. *Clean Soil, Air, Water*. 2009;37(4–5):386–391. doi: 10.1002/clen.200800212

Kuchko T. Yu., Il'mast N. V. Cage trout farming in the Republic of Karelia (current situation and prospects). *Rybovodstvo i rybnoe hozyaistvo = Fish Breeding and Fisheries*. 2016;9:8–13. (In Russ.)

Kuchko Ya. A., Kuchko T. Yu. The zooplankton community of Lake Onega in the areas of trout farms as an indicator of water quality. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2010;4:9–12. (In Russ.)

Litvinova I. A., Litvinenko A. V., Bogdanova M. S. Analysis of water management use of the catchment area based on GIS technologies. *Krupneishie ozero-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic*

impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 52–60. (In Russ.)

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;5:35–52. doi: 10.17076/lim303 (In Russ.)

Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Assessing external water exchange of lake bays by water chemistry characteristics. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2019;46(1):94–102. doi: 10.31857/S0321-059646191-101 (In Russ.)

Mamontov I. Yu. Russian trout farming and the prospect of development. *Nauka bez granits = Science without Borders*. 2021;1:55–59. (In Russ.)

Mazaheri Kohanestani Z., Ghorbani R., Hajimoradloo A., Naeimi A., Fazel A. The effects of trout farm effluents on water quality parameters of Zaringol Stream (Golestan, Iran) Using NSFQI and WQI Indexes. *Environmental Resources Research*. 2013;1(2):191–202.

Milyanchuk N. P., Il'mast N. V., Sterligova O. P., Rasputina E. N., Filatov I. V. The fish population of Lake Syamozero near a trout farm. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;11:42–49. doi: 10.17076/eco1116 (In Russ.)

Mikhailenko V. G., Sterligova O. P. Some ecological aspects of rainbow trout cage rearing. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2021;12:82–90. doi: 10.17076/eco1509 (In Russ.)

OST (Industry standard) 15.372-87. Water for fish farms. General requirements and norms. (In Russ.)

Pavlovskii S. A. Comparative characteristics and long-term dynamics of macrozoobenthos and the main biotopes of the Syamozera ecosystem (South Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2014;2:140–146. (In Russ.)

Ryzhkov L. P., Dzyubuk I. M., Gorokhov A. V., Marchenko L. P., Artem'eva N. V., Ieshko T. A., Ryabinkina M. G., Radnaeva V. A. The state of the aquatic environment and biota during operation of trout-breeding pond farms. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2011;38(2):239–247. (In Russ.)

Ryzhkov L. P., Onishchenko I. N., Onishchenko N. A., Shustov Yu. A. Features of the distribution of native lake fish in the zone of influence of the trout farm. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2014;2:23–29. (In Russ.)

Sabylina A. V. Current state and change of the Lake Onego ecosystem (Verkhne-Svirsky Reservoir). Hydrochemistry studies. External load on the lake. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015a. P. 68–72. (In Russ.)

Sabylina A. V. Current state and change of the Lake Onego ecosystem (Verkhne-Svirsky Reservoir). Hydrochemistry studies. Chemical composition of Lake Onego bays exposed to anthropogenic impact. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs of the North-West European part of Russia: current state and changes of ecosystems under climate variability and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015b. P. 77–88. (In Russ.)

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Water chemistry in Lake Onega and its tributaries. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(6):717–729. (In Russ.)

Sindilariua P.-D., Reiter R., Wedekind H. Impact of trout aquaculture on water quality and farm effluent treatment options. *Aquat. Living Resour.* 2009;22:93–103.

State report on the state of the environment in the Republic of Karelia in 2019. Petrozavodsk; 2020. 248 p. (In Russ.)

State report on the state of the environment in the Republic of Karelia in 2020. Petrozavodsk; 2021. 277 p. (In Russ.)

Sterligova O. P., Il'mast N. V. The state and prospects of development of trout farming in the Republic of Karelia. *Rybokhozyaistvennye vodoemy Rossii: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: Mat-ly II Vseros. nauch. konf. s mezhdunarodnym uchastiem (Sankt-Peterburg, 2–4 aprelya 2018 g.) = Fishery reservoirs of Russia: Fundamental and applied research. Proceedings of the II all-Russian scientific conference with int. participation (St. Petersburg, April 2-4, 2018)*. St. Petersburg; 2018. P. 591–595. (In Russ.)

Sterligova O. P., Kitaev S. P., Il'mast N. V., Kuchko Ya. A., Pavlovskii S. A., Savosin E. S. The state of the Keften Bay of Lake Onego in the conditions of commercial cultivation of rainbow trout. *Biologicheskie resursy Belogo morya i vnutrennikh vodoemov Evropeiskogo Severa: Mat-ly XXVIII Mezhdunar. konf. (Petrozavodsk, 5–8 oktyabrya 2009 g.) = Biological resources of the White Sea and inland waters of the European North. Proceedings of the XXVIII international conference (Petrozavodsk, October, 5–8, 2009)*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2009. P. 523–528. (In Russ.)

Sterligova O. P., Kitaev S. P., Il'mast N. V., Komulainen S. F., Kuchko Ya. A., Pavlovskii S. A., Savosin E. S. Status of the bays in Lake Onego in the conditions of commercial rainbow trout cultivation. *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal = Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2011;3:386–393. (In Russ.)

Tekanova E. V., Ryzhakov A. V., Kalinkina N. M., Dmitrieva D. A., Fomina Yu. Yu., Makarova E. M. The current state of the Kondopozhskaya Bay ecosystem (Lake Onego) under the conditions of multifactor impact. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Materialy II Mezhdunar. konf. (19–24 maya 2019 g.) = Lakes of Eurasia: Problems and solutions. Proceedings II international conference (May 19-24, 2019)*. Kazan': AN RT; 2019. Part 1. P. 190–194. (In Russ.)

Varol M., Balci M. Characteristics of effluents from trout farms and their impact on water quality and ben-

thic algal assemblages of the receiving stream. *Environmental Pollution*. 2020;266:115101. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115101

Vasil'eva V. A., Baturina M. A. The state of the bottom fauna of the Nyuvchim Reservoir. *Aktual'nye problemy biologii i ekologii: XXII Vseros. molodezhn. nauch. konf. = Topical issues of biology and ecology. Proceedings of XXII all-Russian conference of young scientists*. Syktyvkar; 2015. P. 60–65. (In Russ.)

Water quality standards for water bodies of commercial fishing importance, including standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of commercial fishing importance

(approved by order of the Ministry of Agriculture of Russia No. 552 dated 13.12.2016). (In Russ.)

Zobkova M. V., Galakhina N. E. Concentration and distribution of phenolic substances in Lake Onego. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mat-ly II Mezhdunar. konf. (19–24 maya 2019 g.) = Lakes of Eurasia: Problems and solutions. Proceedings II international conference (May 19–24, 2019)*. Kazan': AN RT; 2019. Part 2. P. 88–93. (In Russ.)

Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T., Efremenko N., Kulik N. Data on the chemical composition of Lake Onego water in 2019–2021. *Data in Brief*. 2022;42:108079. doi: 10.1016/j.dib.2022.108079

Поступила в редакцию / received: 25.05.2022; принята к публикации / accepted: 09.08.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Галахина Наталия Евгеньевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник
лаб. гидрохимии и гидрогеологии

e-mail: kulakovanata@mail.ru

Зобков Михаил Борисович

канд. техн. наук, заведующий лаб. гидрохимии
и гидрогеологии

e-mail: duet@onego.ru

CONTRIBUTORS:

Galakhina, Natalia

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Laboratory of
Hydrochemistry and Hydrogeology

Zobkov, Mikhail

Cand. Sci. (Tech.), Head of Laboratory of Hydrochemistry
and Hydrogeology

УДК 556.5.04:504.5

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Е. Ю. Яковлев^{1*}, А. С. Дружинина¹, С. В. Дружинин¹,
Н. Л. Иванченко^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (набережная Северной Двины, 23, Архангельск, Россия, 163000), *yakov24lev99@mail.ru

² Центр коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» Северного Арктического федерального университета имени М. В. Ломоносова (ул. Северодвинская, 14, Архангельск, Россия, 163002)

Мурманская область является частью Арктической зоны России и обладает огромным и разнообразным природно-ресурсным потенциалом. Интенсивное развитие горно-добывающей промышленности на Кольском полуострове, разведка и освоение новых запасов полезных ископаемых привели к возрастающему загрязнению металлами вод рек и озер. Данная исследовательская работа направлена на определение качества поверхностных водных экосистем Мурманской области, подверженных сильному антропогенному влиянию. Проведенное исследование основных физико-химических параметров поверхностных вод позволило выявить водоемы как с экстремально высокими, так и с низкими значениями pH, с пониженным окислительно-восстановительным потенциалом, а также с высоким содержанием. Исследование пространственного распределения концентраций широкого круга металлов позволило определить, что Cu, Ni, Co, Pb, Cd, Mn, Sr, Al и Fe являются основными загрязнителями водоемов Кольского полуострова. С использованием методов статистического анализа выявлены характерные загрязняющие вещества для различных районов, требующих наибольшего внимания и дальнейшего контроля. Проведенные исследования качества поверхностных вод и оценка потенциальных рисков для здоровья человека позволили сделать вывод о сильном загрязнении районов Мончегорска, Оленегорска и Апатитов металлами, значительной токсичности вод и высоком риске возникновения канцерогенных и неканцерогенных эффектов при потреблении исследуемой воды. Результаты этого исследования обеспечат информативную основу для будущих оценок риска для окружающей среды и здоровья человека, а также для разработки комплексных мер управления качеством вод озер и рек Кольского полуострова.

Ключевые слова: водные объекты; физико-химические свойства; металлы; индексы качества воды; риск здоровья населения; Арктика

Для цитирования: Яковлев Е. Ю., Дружинина А. С., Дружинин С. В., Иванченко Н. Л. Оценка воздействия промышленных выбросов на качество поверхностных вод Кольского полуострова // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 88–101. doi: 10.17076/lim1617

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-77-10057.

**E. Yu. Yakovlev^{1*}, A. S. Druzhinina¹, S. V. Druzhinin¹, N. L. Ivanchenko^{1,2}.
ASSESSMENT OF THE IMPACT OF INDUSTRIAL DISCHARGES ON SURFACE
WATER QUALITY IN THE KOLA PENINSULA**

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (23 Nab. Severnoy Dviny, 163000 Arkhangelsk, Russia), *yakov24lev99@mail.ru

² Arktika Core Facility of the Northern (Arctic) Federal University (14 Severodvinskaya St., 163002 Arkhangelsk, Russia)

The Murmansk Region is part of the Russian Arctic enormously rich in diverse natural resources. The intensive development of the mining industry on the Kola Peninsula, the exploration and exploitation of new mineral reserves have augmented the pollution of surface waters in rivers and lakes with metals. The aim was to assess the quality of surface water ecosystems exposed to heavy anthropogenic pressure in the Murmansk Region. The analysis of the main physical and chemical parameters of surface waters revealed water bodies with both extremely high and low pH values, with low redox potential, and high salinity. The study of the spatial distribution of concentrations of a wide range of metals showed that Cu, Ni, Co, Pb, Cd, Mn, Sr, Al, and Fe were the main pollutants of water bodies in the Kola Peninsula. Using statistical analysis techniques were identified the pollutants characteristic for different areas, which require closer attention and further control. The assessment of the quality of surface waters and potential risks to human health led to the conclusions that Monchegorsk, Olenegorsk and Apatity areas were heavily polluted with metals, water toxicity in the areas is high, and the use of this water is fraught with a high risk of carcinogenic and non-carcinogenic effects. The results of this study will serve as a background for future environmental and health risk assessments, as well as for the development of an integrated set of actions for surface water quality management on the Kola Peninsula.

Keywords: water bodies; physical and chemical properties; metals; water quality indices; public health risk; Arctic

For citation: Yakovlev E. Yu., Druzhinina A. S., Druzhinin S. V., Ivanchenko N. L. Assessment of the impact of industrial discharges on surface water quality in the Kola Peninsula. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 88–101. doi: 10.17076/lim1617

Funding. The study was funded by Russian Science Foundation grant # 20-77-10057.

Введение

Загрязнение водной среды металлами вызывает озабоченность во всем мире из-за их потенциальной токсичности [Kumar et al., 2019]. Перенос металлов в водную среду происходит из естественных и техногенных источников. Основными природными источниками металлов являются выветривание горных пород, высвобождение из донных отложений, взаимодействие воды с почвой [Huffmeyer et al., 2009]. Техногенные источники включают прямые сбросы сточных вод в реки и озера в процессе добычи руды, работы горнодобывающих и металлургических заводов. Концентрация металлов также увеличивается в результате поступления бытовых, промышленных сточных вод, оросительной воды и атмосферных выбросов [Ji et al., 2018].

Возрастание техногенной нагрузки на водосборные территории ведет к увеличению загрязнения поверхностных вод металлами. Данные элементы имеют склонность к биоаккумуляции в пищевой цепи и относятся к классу консервативных загрязняющих веществ, которые не разлагаются в природных водах, а только изменяют форму нахождения [Haque et al., 2019]. Загрязнение водной среды металлами привлекло большое внимание из-за того, что оно может нанести необратимый ущерб здоровью человека [Chowdhury et al., 2016]. Воздействие данных загрязнителей может привести к физическим, мышечным и неврологическим расстройствам, к умственным нарушениям, потере слуха, зрительной и двигательной функции [Chowdhury et al., 2016; Saha, Paul, 2019]. Длительное воздействие может вызвать бо-

лезнь Альцгеймера, Паркинсона, рассеянный склероз и рак [Tchounwou et al., 2012].

Кольский полуостров является частью Арктической зоны России и обладает разнообразным природно-ресурсным потенциалом. Экологическая ситуация в округе формируется под влиянием предприятий горнодобывающей, горнообработывающей и металлургической промышленности на окружающую среду. В недрах Кольского полуострова открыто более 60 крупных месторождений различных видов минерального сырья [Качество..., 2020]. В настоящее время происходит добыча медно-никелевых, железных, нефелин-апатитовых руд, руд алюминиевого сырья, циркония, редкоземельных металлов, вермикулита, кобальта, платины и многих других [Даувальтер, Кашулин, 2015; Кашулин и др., 2019; Качество..., 2020].

Основными источниками загрязнения водных объектов Мурманской области являются сточные воды таких горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, как АО «Кольская горно-металлургическая компания (ГМК)»; АО «Апатит»; АО «Ковдорский горно-обогательный комбинат (ГОК)»; ООО «Ловозерский ГОК»; АО «Олкон». Изменения химического состава поверхностных вод вызваны как поступлением поллютантов из техногенных водоемов-отстойников, массивов отвалных пород и атмосферных выбросов, так и нарушением естественного гидродинамического и гидрохимического режима поверхностных и подземных вод [Даувальтер, Кашулин, 2015; Даувальтер, Даувальтер, 2019; Кашулин и др., 2019; Dauvalter et al., 2020]. В реках и озерах Мурманской области наблюдаются высокие и экстремально высокие уровни загрязненности воды соединениями металлов, фторидами, сульфатами, соединениями минерального азота. Основными загрязняющими металлами на территории Кольского полуострова являются Al, Cu, Ni, Mn, Fe, Cr, Co, V, Mo и Zn [Даувальтер, Кашулин, 2014, 2018]. Также значительный вклад в загрязнение вод вносят предприятия жилищно-коммунального хозяйства и хозяйственно-бытовые сточные воды. Следствием загрязнения является резкое ухудшение качества поверхностных вод. Так, например, питьевая вода, поступающая в г. Мончегорск из оз. Имандра, характеризуется относительно высоким содержанием Ni (11,6 мкг/л), Cu (12,1 мкг/л), Cd (0,30 мкг/л) и др. [Moiseenko et al., 2018]. К сожалению, существующие в Мурманской области системы водоподготовки не способны удалить металлы из питьевой воды. Вследствие этого обнаружены повышенные концентрации Ni, Cu, Co, Cd и Pb в печени и почках жителей Мончегорска,

Апатитов, Оленегорска и Ловозера [Moiseenko et al., 2018].

Таким образом, актуальной представляется современная оценка качества водных экосистем Мурманской области. В связи с этим целью исследования является оценка: 1) воздействия горнодобывающей промышленности на состояние водных объектов Мурманской области; 2) влияния их загрязнения на здоровье человека. Результаты исследования обеспечат информативную основу будущих оценок риска для окружающей среды и здоровья человека, а также для разработки комплексных мер управления качеством поверхностных вод Кольского полуострова.

Материалы и методы

Район исследований расположен на северо-западе европейской части России, на Кольском полуострове (рис. 1). Отбор проб производился в июле 2020 г. В число опробованных водных объектов входят 62 водотока (река, канал или ручей) и 44 озера. В каждом водном объекте однократно отбиралось от 1 до 3 проб (горизонт 0 м), в зависимости от размеров водоема. Общее число проб воды – 125. В район исследований входит 9 участков: L-1 – Южные фоновые территории (31 водоем, 32 пробы), L-2 – г. Ковдор (6 водоемов, 7 проб), L-3 – г. Кировск (6 водоемов, 7 проб), L-4 – г. Апатиты (8 водоемов, 11 проб), L-5 – г. Мончегорск (18 водоемов, 25 проб), L-6 – г. Оленегорск (12 водоемов, 16 проб), L-7 – п. Ревда (11 водоемов, 10 проб), L-8 – с. Ловозеро (3 водоема, 5 проб), L-9 – Северные фоновые территории (9 водоемов, 12 проб). Фоновые территории отличаются пониженной техногенной нагрузкой со стороны горно-обогательных комбинатов и стоков жилищно-коммунальных хозяйств.

Измерения показаний pH, Eh, содержания проводили непосредственно в воде исследуемых объектов портативным многопараметровым pH/ОВП-метром HI 9126 (pH/ORP/T) (США, Hanna Instruments), измерение содержания воды (TDS) проводили кондуктометром MAPK-603/1 («ВЗОР», Россия).

Отбор проб воды на анализ микроэлементов проводили в одноразовые стерильные пробирки объемом 50 мл из полимерного материала. Воду фильтровали одноразовым стерильным шприцем через одноразовый мембранный фильтр с полиэфирсульфоновой мембраной с размером пор 0,45 мкм (TPP Techno Plastic Products AG, Швейцария), далее добавляли конц. HCl («Вектон», Россия) до pH < 2 для консервации. Определение

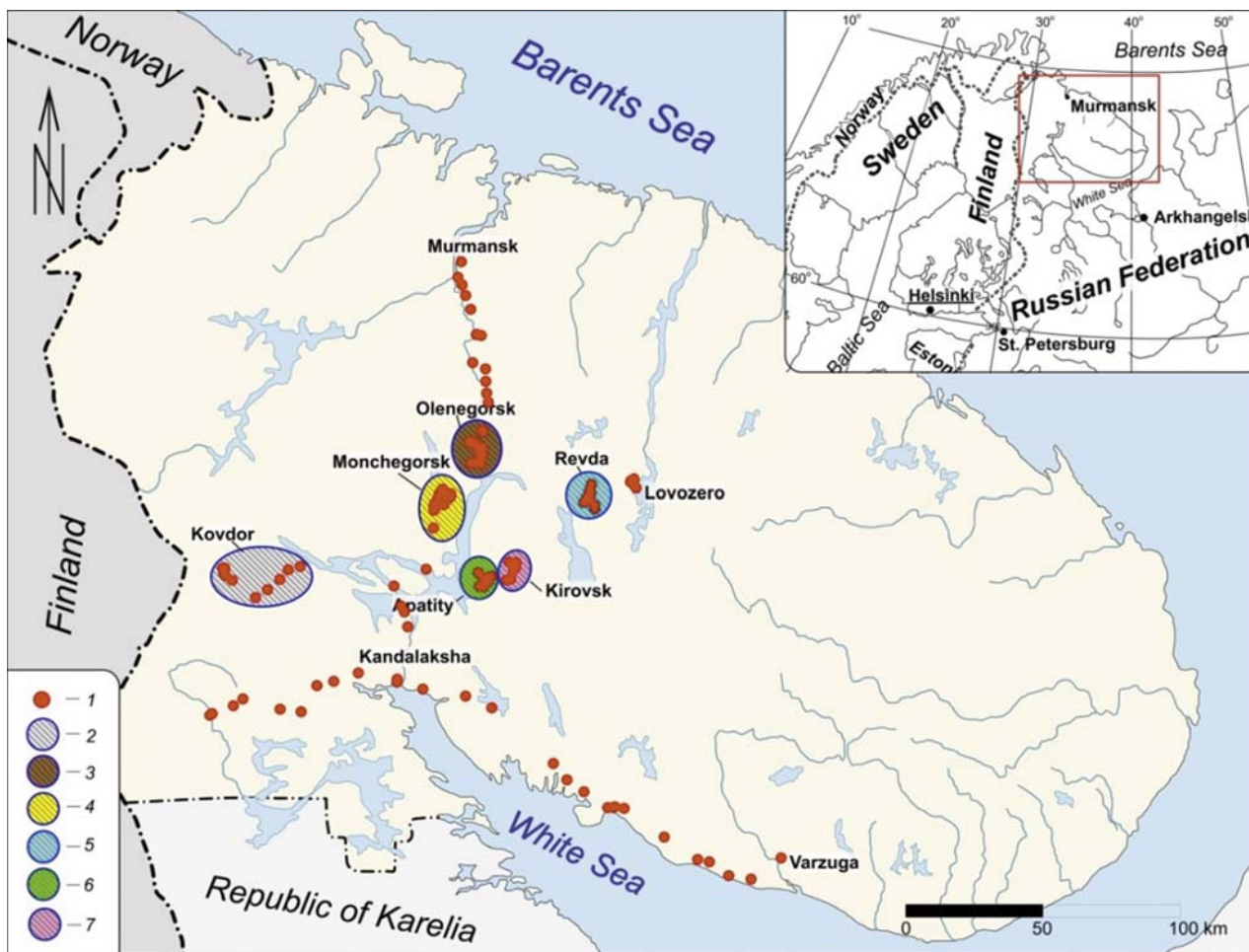


Рис. 1. Расположение точек отбора проб и характер горно-обогатительной деятельности исследуемых районов: 1 – точки отбора проб; 2 – добыча и переработка бадделеит-апатит-магнетитовых руд (г. Ковдор, район L-2); 3 – добыча железной руды (г. Оленегорск, район L-6); 4 – переработка медно-никелевых руд (г. Мончегорск, район L-5); 5 – добыча и переработка лопаритовой руды (п. Ревда, район L-7); 6 – переработка апатито-нефелиновых руд (г. Апатиты, район L-4); 7 – добыча апатит-нефелиновой руды (г. Кировск, район L-3)

Fig. 1. Location of the sampling sites and type of mining and processing activity of the studied areas: 1 – sampling sites; 2 – mining and processing of baddeleyite-apatite-magnetite ores (Kovdor, location L-2); 3 – iron ore mining (Olenegorsk, location L-6); 4 – copper-nickel ores processing (Monchegorsk, location L-5); 5 – mining and processing of loparite ore (Revda, location L-7); 6 – apatite-nepheline ore processing (Apatity, location L-4); 7 – apatite-nepheline ore mining (Kirovsk, location L-3)

концентраций Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb, V, As, Sr, Mg, Fe в пробах воды выполнялось согласно методике [М 03-505-119-03..., 2003] с помощью атомно-абсорбционного спектрометра Shimadzu AA-7000 (Япония) с пламенным и электротермическим атомизаторами. Метод заключается в распылении определяемых элементов путем нагрева образца до высокой температуры при распылении в пламя (Cu, Zn, Sr, Mg, Fe) или в графитовой печи (Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb, V, As, Fe) и измерении поглощения излучения резонансной длины волны

атомарными парами определяемого элемента. Относительная погрешность метода по отношению к металлам (%): Al – 30, As – 30, Ba – 29, Cd – 16, Co – 30, Cr – 30, Cu – 24, Fe – 22, Mg – 11, Mn – 15, Ni – 14, Pb – 30, Sr – 15, V – 25, Zn – 20. Качество анализа обеспечивалось тремя параллельными измерениями в одной пробе-емкости (в таблицах указаны средние значения), а также своевременной калибровкой атомно-абсорбционного спектрометра по ГСО.

Индекс оценки металлов (НМЕI) предоставляет информацию об общем качестве

воды по отношению к металлам и рассчитывается с использованием уравнения (1):

$$HMEI = \sum_{i=1}^n \frac{HM_{Conc}}{HM_{MPC}}, \quad (1)$$

где HM_{Conc} – концентрация металлов, а HM_{MPC} – ПДК того же металла. Пороговое значение 1,0 означает, что при $HMEI < 1,0$ вода пригодна, а при значении $> 1,0$ – непригодна для бытового использования [Zakir et al., 2020]. Также используется классификация уровней загрязнения воды [Haque et al., 2019]: $< 0,3$ – очень чистая, $0,3-1,0$ – чистая, $1,0-2,0$ – слегка загрязнена, $2,0-4,0$ – умеренно загрязнена, $4,0-6,0$ – сильно загрязнена, $> 6,0$ – серьезно загрязнена.

Индекс токсичности металлов (HMTL) рассчитывается как произведение содержания металлов в воде (C_i , мг/л) на их суммарный балл опасности (HIS_i , табл. 1) по уравнению (2):

$$HMTL = \sum_{i=1}^n C_i \times HIS_i. \quad (2)$$

В рамках проведенных исследований введена классификация вод: 0–100 – низкая токсичность; 100–300 – умеренная токсичность; 300–500 – высокая токсичность; 500–1000 – очень высокая токсичность; выше 1000 – чрезвычайно высокая токсичность.

Неканцерогенный риск для здоровья населения (HI_{ing} , HI_{derm}). Определялось воздействие металлов при проглатывании воды и всасывании через кожу. Поглощенная

доза для человека рассчитывается на основе хронического суточного поступления (ADD) [Kumar et al., 2019] с использованием уравнений 3 и 4:

$$ADD_{ing} = \frac{C_i \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}, \quad (3)$$

$$ADD_{derm} = \frac{C_i \times SA \times K_p \times ET \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}, \quad (4)$$

где ADD_{ing} (мкг/кг в день) и ADD_{derm} (мкг/кг в день) – средние суточные дозы при проглатывании и абсорбции воды через кожу [Kumar et al., 2019]. В уравнениях (3) и (4) C_i – концентрация металла (мкг/л), IR – скорость приема внутрь (2,0 л/день), EF – частота воздействия (350 дней), ED – продолжительность воздействия (30 лет), BW – масса тела (70 кг), AT – среднее время (10 950 дней), SA – открытая площадь кожи (18 000 см²), K_p – коэффициент прилипания к коже (табл. 1), ET – время воздействия (0,58 ч/сут), CF – коэффициент пересчета (0,001).

Коэффициент опасности (HQ) рассчитывался по уравнению (5):

$$HQ_{ing/derm} = \frac{ADD_{ing/derm}}{RfD_{ing/derm}}, \quad (5)$$

где RfD_{ing} и RfD_{derm} – пероральные и кожные эталонные дозы (мкг/кг день) (табл. 1), HQ_{ing} и HQ_{derm} – коэффициенты опасности при проглатывании и при абсорбции через кожу.

HI представляет собой общий потенциальный неканцерогенный риск для здоровья насе-

Таблица 1. Значения параметров микроэлементов

Table 1. Values of the microelement parameters

Элемент Element	C_i , мкг/л C_i , µg/l	HIS_i	K_p	RfD_{ing}	RfD_{derm}	SF, мг/л SF, mg/l
Al	200	685	$1 \cdot 10^{-3}$	1,3	0,07	-
Cr	50	895	$2 \cdot 10^{-3}$	3	0,08	0,5
Mn	500	797	$1 \cdot 10^{-3}$	24	0,96	-
Co	100	1011	$4 \cdot 10^{-4}$	0,3	0,06	-
Ni	20	993	$2 \cdot 10^{-4}$	20	0,8	1,7
Cu	2000	805	$1 \cdot 10^{-3}$	40	8	-
Zn	3000	913	$6 \cdot 10^{-4}$	300	60	-
Cd	3	1318	$1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,03	15
Ba	1300	800	$1 \cdot 10^{-3}$	70	14	-
Pb	10	1531	$1 \cdot 10^{-4}$	1,4	0,42	0,0085
V	-	648	$1 \cdot 10^{-3}$	1	0,01	-
As	10	1676	$1 \cdot 10^{-3}$	0,3	0,12	1,5
Sr	-	0	$1 \cdot 10^{-3}$	600	120	-
Mg	-	0	$1 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
Fe	300	0	$1 \cdot 10^{-3}$	700	140	-

ления. Он рассчитывается с использованием уравнения (6) [Zakir et al., 2020]:

$$HI_{ing/derm} = \sum_{i=0}^n HQ_{ing/derm}. \quad (6)$$

Пороговое значение HI установлено на уровне 1,0, т. е. при HI 1,0 высока возможность неканцерогенного риска для здоровья населения.

Канцерогенный риск для здоровья (CR) в течение жизни возникает при воздействии Cr, Ni, Cd, As, Pb. Потенциальные канцерогенные риски рассчитываются путем умножения ADD и коэффициента (SF, мг/л день, табл. 1) [Kumar et al., 2019] по уравнению 7:

$$CR_{ing/derm} = ADD_{ing/derm} \times SF. \quad (7)$$

CR перорального и кожного воздействия канцерогенов учитывали при расчете общего ΣCR . Допустимый диапазон ΣCR составляет от $1,0 \times 10^{-6}$ до $1,0 \times 10^{-4}$, а значения $> 10^{-4}$ указывают на высокий риск развития рака.

Статистический анализ, а именно анализ главных компонент (АГК), проведен для выявления возможных источников загрязнения в исследуемых поверхностных водах. Данные проанализированы с использованием статистического программного обеспечения IBM SPSS Statistics 20, для анализа были выбраны 2–3 компоненты.

Результаты и обсуждение

Физико-химические свойства поверхностных вод

Физико-химические свойства (рН, Eh, минерализация) исследованных поверхностных водных объектов Кольского полуострова представлены в таблице 2. Средние значения рН воды для исследуемой территории варьируются от 6,90 до 8,95 единиц, притом по рекомендации ВОЗ для питьевой воды значения рН должны находиться в пределах 6,5–8,5 ед. В целом значения рН ниже 6,5 наблюдаются для 4 % отобранных проб, в то время как значения рН выше 8,5 получены для 13,6 % проб, что позволяет сделать вывод о проблеме защелачивания водоемов Мурманской области. Наибольшие опасения вызывают районы L-3–L-5, а также L-2 и L-7. Низкие значения рН характерны для озер, находящихся на территории химического выгорания растительности (например, озера в Мончегорске (L-5)), тогда как повышенные значения рН характерны для рек и озер, подверженных влиянию промышленных

сточных вод (например, реки Белая и Жемчужная). Ранее было отмечено, что вблизи горно-металлургического комбината «Печенганикель» наблюдается рост значений рН озерных вод на 0,5–1,0 ед. [Даувальтер, Кашулин, 2018], что обусловлено накоплением породообразующих макроэлементов, содержащихся в выбросах комбината.

Среднее значение окислительно-восстановительного потенциала в исследуемых поверхностных водах варьируется от –110,7 до 6,4 мВ, следовательно, в исследуемых водах происходят как окислительные, так и восстановительные процессы. Обычно восстановительная среда (Eh < 0) в природных условиях наблюдается в грунтовых водах за счет присутствия сероводорода и металлов с низкой валентностью (Fe²⁺, Mn²⁺, Mo⁴⁺, V⁴⁺, U⁴⁺), однако для большинства исследуемых территорий (L-1–L-4, L-6 и L-7) определен восстановительный режим.

Солесодержание поверхностных вод Кольского полуострова варьируется в широких пределах (9,4–3323 мг/л), средние значения находятся в интервале от 49,4 до 282 мг/л. Повышенное солесодержание характерно для некоторых водоемов из районов L-2, L-5 и L-7, притом в озерах вблизи отвалов Мончегорского участка Кольской ГМК солесодержание превышает допустимое значение (выше 1000 мг/л), установленное ВОЗ. Стоит отметить, что в нескольких озерах, расположенных в районе деятельности комбинатов «Североникель», «Апатит», «Ковдорский ГОК», солесодержание в зависимости от времени года изменяется в пределах 23,2–2651 мг/л [Даувальтер, 2019; Dauvalter et al., 2020], что, вероятно, связано с сезонным сбросом сточных вод.

Содержание металлов в поверхностных водах

Для водных объектов в районах L-2–L-8 наблюдается превышение средних концентраций всех элементов (за исключением Cr) в 2 и более раз по сравнению со средним содержанием металлов в поверхностных водах фоновых территорий (табл. 2).

Так, относительно средних фоновых концентраций для района г. Ковдор (L-2) отмечено превышение Sr, Ba, Co, Mg и Ni. Наиболее загрязненными являются руч. Безымянный у отвалов Ковдорского ГОКа и оз. Безымянное, в котором накапливаются техногенные воды комбината, – в них обнаружены Sr (до 3,08 мг/л), Co (до 2,92 мкг/л), Mg (до 48 мг/л), Ba (до 117 мкг/л) и Ni (до 25 мкг/л). Ковдорский

Таблица 2. Физико-химические свойства и содержание металлов в поверхностных водах Кольского полуострова
 Table 2. Physical and chemical properties and content of metals in the surface waters of the Kola Peninsula

Район отбора Sampling area	Физико-химические свойства Physiochemical properties											Содержание металлов в воде, мкг/л Metal content in water, µg/l										
	pH	Eh, mV	TDS	Mg	Fe	Sr	Al	Ni	Mn	Ba	Cu	Zn	Cr	V	Co	As	Pb	Cd				
L-1	min	4,25	-50,9	9,4	499	20	13	1,2	0,6	1,6	нпо*	нпо	0,9	0,14	0,02	нпо	нпо					
	max	9,12	123,9	875	26500	978	257	5,8	38,0	15,0	3,60	31,0	5,1	15,0	0,27	0,89	0,246	нпо				
	aver.	7,13	-7,31	49,4	2016	200	41	2,8	5,0	6,0	0,60	2,52	2,6	1,80	0,06	0,15	0,029		нпо			
L-2	min	7,71	-99,2	84,8	5430	16	3	3,9	0,9	30,0	0,08	нпо	1,4	1,90	0,17	0,09	нпо					
	max	8,78	-41,1	737	48000	89	106	25,0	29,0	209	2,24	3,90	4,3	2,50	2,92	0,44	нпо	0,039				
	aver.	8,19	-70,76	256	19039	57	28	10,7	6,1	79,7	0,81	1,28	2,8	2,20	0,67	0,23		0,006				
L-3	min	7,34	-189,9	16,1	78	20	16	1,1	0,3	1,5	0,14	нпо	1,2	0,11	нпо	0,03	нпо					
	max	9,97	-19,4	238	1920	55	194	8,1	6,9	9,0	1,40	2,70	3,1	3,70	0,20	2,80	нпо	0,357				
	aver.	8,95	-110,7	108	532	32	81	3,5	1,7	4,2	0,93	0,65	1,9	1,33	0,10	0,93		0,113				
L-4	min	6,89	-154,7	9,4	349	33	11	2,5	0,9	0,9	0,33	нпо	1,0	0,11	0,02	0,02	нпо					
	max	9,58	4,0	335	9220	499	806	37,0	431	533	13,0	138	18,0	15,0	0,55	2,60	8,80	0,273				
	aver.	8,23	-72,2	132	1668	108	193	9,3	44,4	57,7	2,38	13,2	3,6	3,83	0,20	0,95	0,804	0,114				
L-5	min	3,71	-146,6	14,0	716	14	4	12,0	0,5	1,6	3,30	0,54	0,2	0,32	0,07	0,07	нпо					
	max	9,51	195,0	3323	11700	415	872	3420	64,0	45,0	2350	28,0	3,5	30,0	53,0	2,70	3,70	0,745				
	aver.	6,90	6,4	282	4801	100	71	434	15,3	13,7	188	4,73	1,3	4,53	6,58	0,70	0,242	0,086				
L-6	min	6,76	-81,3	16,7	1100	11	7	4,1	3,5	3,9	0,88	нпо	1,6	0,21	0,05	0,11	нпо					
	max	8,41	12,9	395	20000	3970	2120	47,0	947	77,0	8,80	44,0	6,2	2,80	1,24	0,36	5,00	0,087				
	aver.	7,50	-29,1	119	6226	579	182	15,6	85,1	27,1	2,82	4,71	3,2	0,75	0,41	0,21	0,389	0,013				
L-7	min	6,67	-176,3	13,2	100	22	11	нпо	0,9	0,7	0,15	4,70	0,3	0,05	нпо	0,02	нпо					
	max	10,01	19,1	1168	2210	329	884	2,7	169	17,0	2,50	0,52	1,4	1,50	0,16	9,70	0,684	0,029				
	aver.	8,11	-63,3	145	792	130	133	1,3	24,6	3,8	0,63	1,98	0,9	0,62	0,04	1,31	0,068	0,004				
L-8	min	6,54	-7,8	20,7	1100	577	20	1,6	28,0	5,0	0,30	1,10	0,8	0,29	0,09	0,06	нпо					
	max	7,13	28,5	38,3	4190	1260	266	13,0	161	17,0	3,90	31,0	9,5	0,56	0,47	0,19	1,90	0,058				
	aver.	6,90	6,1	28,7	2442	917	78	6,4	96,0	9,2	1,69	8,88	3,9	0,41	0,18	0,10	0,380	0,012				
L-9	min	6,59	-27,40	11,3	719	20	3	2,7	нпо	2,8	0,43	нпо	1,4	0,17	нпо	0,02	нпо					
	max	7,45	25,30	319	10300	274	51	6,4	72,0	14,0	2,60	3,20	3,4	4,70	0,18	0,31	0,036	нпо				
	aver.	6,93	4,28	49,4	2377	130	28	3,9	15,5	5,5	1,26	1,10	2,5	0,67	0,07	0,15	0,009					
Средние фоновые концентрации металлов Average background concentrations of metals				2197	165	34	35	3,4	10,3	5,8	0,93	1,81	2,6	1,24	0,07	0,15	0,019	< 0,01				

Примечание. *нпо – ниже предела обнаружения.
 Note. *нпо – below detection limit.

ГОК производит апатитовый, бадделеитовый и железорудный концентрат. Стронций является типоморфным элементом нефелиновых сиенитов Хибинского массива [Кашулин и др., 2019; Dauvalter et al., 2020].

Водоемы в районе г. Кировска (L-3) характеризуются превышением содержания Cd, As, Sr и Al. Основным источником загрязнения в данном районе является ГОК «Апатит», занимающийся производством фосфатного сырья из апатито-нефелиновых руд. Наиболее сильное воздействие наблюдается в реках Лопарская и Юкспорройк (Cd до 0,357 мкг/л, As до 2,80 мкг/л, Sr до 332 мкг/л и Al до 194 мкг/л), в которые производится сброс сточных вод из рудников Кировский и Рассвумчоррский соответственно, и также для этих рек необходимо отметить экстремальную щелочную реакцию среды (рН до 9,6). Указанные реки впадают в оз. Б. Вудъявр, где исследования донных отложений выявили высокий уровень загрязнения металлами (Cu, Zn, Ni, Sr и др.) [Югай и др., 2013].

В водах озер и рек г. Апатиты (L-3) наблюдается повышенное относительно фоновых концентраций содержание Pb, Cd, Ba, Zn, As, Al, Sr, Mn, V, Co, Ni и Cu. Максимальное содержание металлов определено для рек Белая и Жемчужная (мкг/л): Pb – до 8,82, Ba – до 533, Zn – до 138, Cd – до 0,277, Al – до 806, Cu – до 13,0, Ni – до 37,0, As – до 2,63 и Co – 0,55. Загрязнение рек обусловлено сбросами сточных вод филиала ГОК «Апатит», производящего минеральные удобрения [Кашулин и др., 2019; Mazukhina et al., 2020]. Приоритетными загрязнителями являются Sr, Pb, Zn, Al, Fe и т. д. [Evseev, Krasovskaya, 2017]. Значительный вклад в загрязнение р. Жемчужной вносят предприятие жилищно-коммунального хозяйства «Апатитыводоканал» и очистные сооружения п. Титан [Кашулин и др., 2019].

Наиболее загрязненным районом исследования является г. Мончегорск (L-5), где в поверхностных водах выявлены экстремальные концентрации Cu и Ni, а также повышенное содержание Co, Pb, Cd, As, V, Zn, Ba, Mg и Al. Обнаружено, что вода в озерах, расположенных на территории химической деградации почвенного и растительного покрова, содержит критические концентрации (мкг/л) Cu (до 2350), Ni (до 3420), Co (до 53,3), Pb (до 3,73), Cd (до 0,745), Al (до 872), As (до 2,70), Zn (до 28,0), V (до 15,1), Ba (до 45), Mn (до 64) и Mg (до 9,23 мг/л). Территория данных озер загрязняется за счет атмосферных кислотных выпадений Мончегорского участка Кольской ГМК,

которая добывает сульфидные медно-никелевые руды и производит цветные металлы [Denisov et al., 2020]. В исследованиях [Moiseenko et al., 2018] для воды из оз. Монче авторы определили следующие концентрации (мкг/л): Cu – 12,1, Ni – 11,6, Co – 0,4, Pb – менее 0,5, Cd – 0,3 и Al – 39, что ниже средних концентраций Cu, Ni, Co и Al в настоящем исследовании. Вероятно, оз. Монче менее подвержено техногенному загрязнению, вследствие чего является источником питьевой воды для Мончегорска.

Для водоемов в районе г. Оленегорска (L-6) характерно превышение содержания Pb, Mn, Co, Al, Ba, Sr, Ni, Fe, Cu и Mg относительно их фоновых концентраций. Наиболее загрязненными водными объектами в районе являются озера, в которые сбрасываются стоки с хвостохранилищ – в них содержатся высокие концентрации (мкг/л) Pb (до 5,00), Al (до 2120), Fe (до 3970), Co (до 1,24), Ni (до 47,0), Ba (до 77,0), Sr (до 438) и Mn (до 128), а также большое оз. Пермус, в северной части которого выявлен очаг загрязнения такими металлами, как Mn (947 мкг/л), Pb (1,13 мкг/л), Fe (3030 мкг/л), Co (1,15 мкг/л), Al (499 мкг/л), Cd (0,087 мкг/л) и Cu (8,80 мкг/л). Оленегорский ГОК «Олкон», разрабатывающий Оленегорское железорудное месторождение, является основным загрязнителем данного района исследования. В озерах, принимающих стоки «Олкона», зафиксировано наибольшее содержание (мкг/л) Ni (5,4), Cu (5,1), Co (0,38), Al (52) и Sr (113) [Даувальтер, 2019]. Озеро Пермус загрязнено сточными водами Оленегорского механического завода [Даувальтер, 2019].

Исследование водных объектов в районе п. Ревда (L-7) показало превышение концентраций As, Al, Pb, Sr и Mn. В этом районе озеро, располагающееся у отвалов Ловозерского ГОКа, характеризуется наиболее высоким содержанием (мкг/л) As (9,74), Pb (0,684), Al (884), Ba (17,0), Cu (2,50) и Sr (71). Ловозерский ГОК ведет добычу и переработку танталниобиевых руд и редкоземельного сырья для получения лопаритового концентрата.

В поверхностных водах с. Ловозеро (L-8) наблюдается повышенное содержание Pb, Mn, Fe, Sr, Co и Al относительно фоновых концентраций. Одна из проб в р. Вирма показала высокие концентрации (мкг/л) Pb (1,96), Mn (161), Al (266), Fe (1260), Cd (0,058), Sr (192), Cu (3,9), Cr (0,3), Zn (3,10), Ba (17,0), Co (0,07) и Ni (6,9). По литературным данным [Moiseenko et al., 2018], в районе с. Ловозеро поверхностные воды содержат (мкг/л)

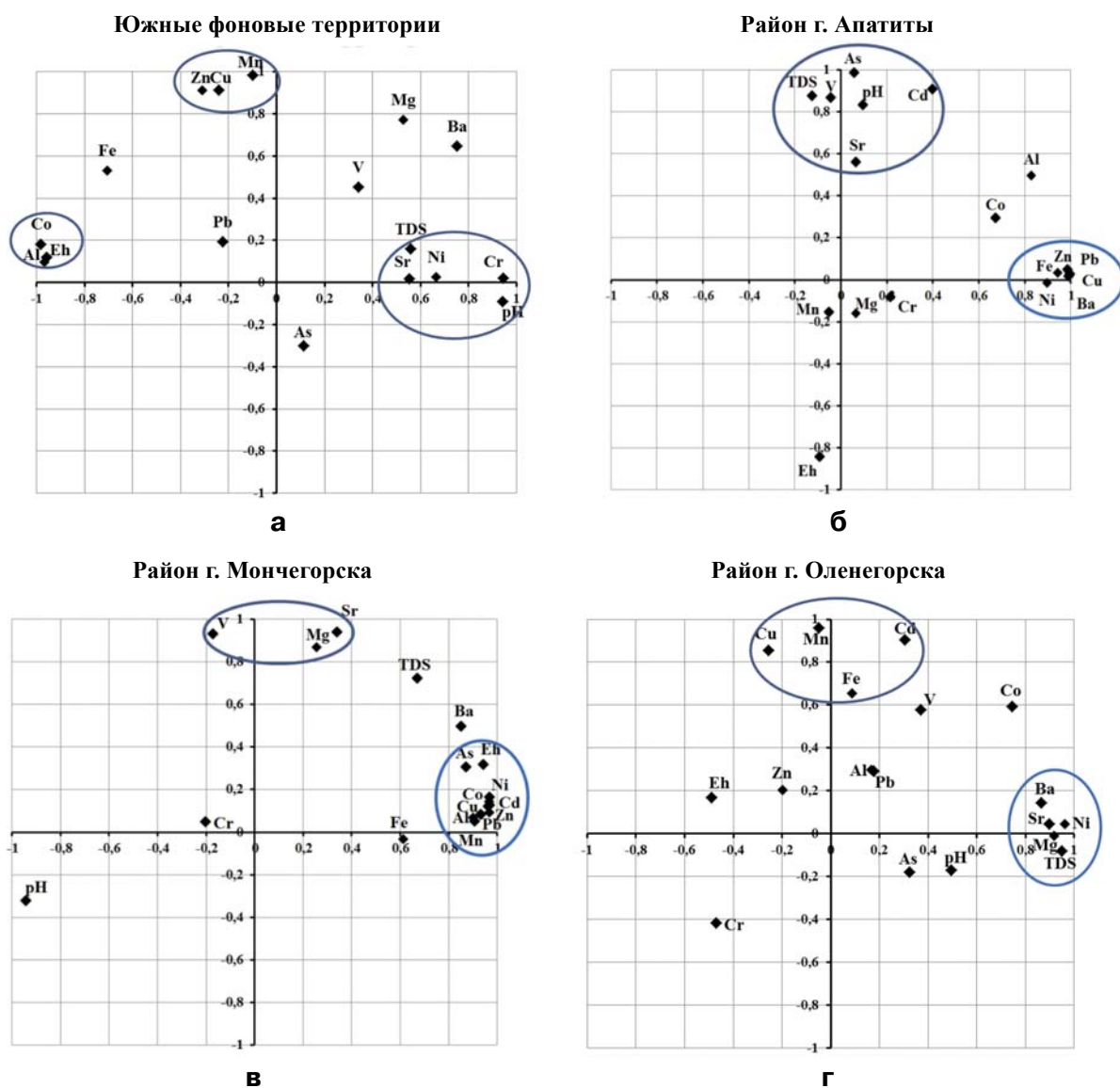


Рис. 2. Анализ главных компонент для четырех исследуемых районов: а – Южные фоновые территории, б – район г. Апатиты, в – район г. Мончегорска, г – район г. Оленегорска

Fig. 2. Principal component analysis for the four study areas: a – Southern background territories, b – area of the Apatity city, c – area of the Monchegorsk city, d – area of the Olenegorsk city

Pb (менее 0,5), Al (99), Fe (815), Cd (0,13), Sr (51), Cu (1,2), Cr (0,3), Co (0,3) и Ni (0,6), что в большинстве случаев согласуется с результатами настоящего исследования. Воды р. Вирма, вероятно, подвержены загрязнению жилищно-коммунальными стоками. Также загрязненная сточными водами Ловозерского ГОКа р. Сергевань несет свои воды в оз. Ловозеро. Повышенное содержание Fe связано с особенностями поверхностных вод в районе с. Ловозеро, связанными с заболоченностью исследуемой территории [Naymushina et al., 2014].

Многофакторный статистический анализ

Для определения взаимосвязей и идентификации возможных источников металлов в водах наиболее загрязненных районов (городов Апатиты, Мончегорск и Оленегорск), а также Южной фоновой территории применялся метод анализа главных компонент (PCA). Для Южной фоновой территории метод PCA позволил выделить три группы металлов (рис. 2, а). Первая группа объединяет в себе Cr, Ni, Sr, а также наблюдаемое повышение солесодержания и pH. Во вторую группу входят Co, Al, от-

мечаемый рост показателя Eh и снижение pH. Третья группа объединяет в себе Zn, Cu и Mn. Вероятно, данные группы образовались в результате воздействия природных факторов, однако они могут быть обусловлены и переносом атмосферных осадков металлургических предприятий на большие расстояния.

Для района г. Апатиты выявлены две группы металлов, которые, вероятно, имеют различные источники поступления (рис. 2, б). Первая группа объединяет в себе Fe, Zn, Pb, Cu, Ba и Ni. Ко второй группе относятся V, As, Cd, Sr, вместе с наблюдаемым повышением содержания и pH и уменьшением показателя Eh. Наиболее вероятно обе выявленные группы металлов связаны с загрязнением рек двумя источниками сточных вод апатит-нефелиновой обогатительной фабрики предприятия «Апатит». Сообщается, что сточные воды апатит-нефелиновых горно-обогатительных производств содержат повышенные концентрации Al, Sr, Fe, Mn и др., а за счет пыления хвостов происходит загрязнение следующими элементами: Al, Sr, Mn, Fe, Ti, Se, V, As, Cu и др. [Моисеенко и др., 2006].

По результатам анализа главных компонент для района г. Мончегорска выявлено две группы металлов, содержание которых находится во взаимосвязи (рис. 2, в). Первая группа объединяет в себе ряд металлов (Al, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb и As), а также наблюдаемое повышение Eh и снижение pH. Предположительно, данная группа образовалась при техногенном влиянии Мончегорского участка Кольской ГМК, выбросы которого содержат Cu, Ni, Pb, Cd, Fe, Co, Zn и Cr [Даувальтер, Кашулин, 2016; Денисов и др., 2018; Denisov et al., 2020]. Вторая группа состоит из V, Sr и Mg. Оставшиеся не сгруппированные металлы имеют смешанное происхождение.

Проведенный многофакторный анализ для района г. Оленегорска позволил выделить две группы элементов (рис. 2, г). К первой группе относятся Ni, Ba, Sr и Mg, а также связанное с ними повышение содержания вод. Наиболее вероятно, данная группа сформировалась при влиянии неочищенных промышленных стоков Оленегорского ГОКа «Олкон». По литературным источникам, в озерах, принимающих сточные воды с железорудного

Таблица 3. Индексы качества воды и риска для здоровья населения (минимальные, максимальные и средние значения)

Table 3. Indices of water quality and risk to public health (minimum, maximum and average values)

Район отбора Sampling area	HMEI	HMTI	HI	CR, 10 ⁻⁴
L-1 – Южные фоновые территории / Southern background territories	<u>(0,37 – 4,22)</u> 1,10	<u>(22,6 – 198)</u> 46,1	<u>(0,40 – 6,10)</u> 1,09	<u>(0,9 – 3,5)</u> 1,7
L-2 – район г. Ковдора / Kovdor area	<u>(0,46 – 1,87)</u> 1,02	<u>(43,4 – 179)</u> 105	<u>(0,31 – 2,66)</u> 0,97	<u>(2,0 – 12,3)</u> 5,5
L-3 – район г. Кировска / Kirovsk area	<u>(0,28 – 1,71)</u> 0,87	<u>(17,7 – 154)</u> 69,7	<u>(0,47 – 4,99)</u> 2,08	<u>(0,8 – 5,0)</u> 2,7
L-4 – район г. Апатиты / Apatity area	<u>(0,35 – 9,28)</u> 2,22	<u>(16,9 – 1193)</u> 246	<u>(0,30 – 19,6)</u> 4,90	<u>(1,5 – 19,8)</u> 5,7
L-5 – район г. Мончегорска / Monchegorsk area	<u>(0,93 – 179)</u> 22,7	<u>(37,7 – 5595)</u> 671	<u>(0,44 – 31,8)</u> 3,31	<u>(6,0 – 1599)</u> 203
L-6 – район г. Оленегорска / Olenegorsk area	<u>(0,74 – 26,0)</u> 3,94	<u>(35,5 – 1665)</u> 241	<u>(0,31 – 49,8)</u> 4,52	<u>(2,4 – 22,4)</u> 7,8
L-7 – район п. Ревда / Revda area	<u>(0,25 – 6,62)</u> 1,38	<u>(19,0 – 648)</u> 121	<u>(0,36 – 21,5)</u> 3,29	<u>(0,2 – 4,4)</u> 1,3
L-8 – район с. Ловозеро / Lovozero area	<u>(2,67 – 6,63)</u> 4,10	<u>(81 – 352)</u> 158	<u>(0,75 – 6,74)</u> 2,10	<u>(0,9 – 6,7)</u> 3,6
L-9 – Северные фоновые территории / Northern background territories	<u>(0,32 – 1,52)</u> 0,87	<u>(12,0 – 96,5)</u> 44,3	<u>(0,14 – 1,32)</u> 0,75	<u>(1,6 – 3,5)</u> 2,2

производства «Олкон», наблюдаются повышенные значения Ni, Co, Sr, Cu и Al, ионов Mg, а также повышенная минерализация [Даувальтер, 2019]. Вторая группа объединяет в себе Mn, Cu, Cd, Fe, и, возможно, источником поступления данных металлов являются атмосферные выпадения Оленегорского ГОКа.

Показатели качества поверхностных вод и опасность металлов для здоровья

Концентрации металлов не всегда отражают уровень загрязнения вод. При расчете индексов загрязнения (табл. 3) можно получить более убедительную оценку состояния водоемов, поскольку каждый металл рассматривается в соответствии с его токсичностью, а также с общей нагрузкой загрязнения.

Индекс HMEI рассчитывается на основе суммы отношений измеренных концентраций металлов к их ПДК. Водоемы Северных фоновых территорий (L-9) в общем можно отнести к чистым, тогда как воды Южных фоновых территорий, за счет повышенного природного содержания Fe, классифицируются как слегка загрязненные. На уровне фоновых значений индекса находятся воды в районах Ковдора (L-2) и Кировска (L-3), где основными влияющими на индекс металлами являются Ni (для L-2) и Al (для L-3). Слегка загрязненной является вода в районе п. Ревда (L-7), на индекс которой повлияли концентрации Al и Fe. Водоемы в районах Апатитов (L-4) и Оленегорска (L-6) относятся к классу умеренно загрязненных за счет Al и Ni (для L-4) и Fe, Al и Ni (для L-6). Более загрязненными являются водоемы в районе с. Ловозеро, воды которых относятся к классу сильно загрязненных за счет высокого природного содержания Fe. Наиболее загрязненное озеро с HMEI = 179 обнаружено в районе г. Мончегорска (L-5), и в среднем воды в районе L-5 классифицируются как серьезно загрязненные за счет Ni.

Индекс HMTL оценивает уровень металлов в природных водах, влияющий на здоровье человека [Kumar et al., 2019]. Согласно полученным результатам, низкой токсичностью обладают воды Северных (L-1) и Южных (L-9) фоновых территорий, а также района г. Кировска (L-3). Водные объекты районов г. Ковдора (L-2), п. Ревда (L-7) и с. Ловозеро (L-8) характеризуются умеренной токсичностью за счет содержания Ba, Ni, Al для L-2, Al и Mn для L-7 и L-8. Средняя умеренная токсичность вод, обоснованная содержанием Al, Mn, Ni, Ba, определена для Апатитов (L-4) и Оленегорска (L-6), притом

для отдельных водных объектов показана чрезвычайно высокая токсичность (р. Белая, озеро в районе хвостохранилища, оз. Пермус). Очень высокая токсичность определена для г. Мончегорска (L-5), где максимальные значения индекса для озер на территории химической деградации растительности составляют 5077 и 5595 соответственно за счет Ni, Cu, Al, Mn, Co и Ba в воде.

Оценка потенциальных неканцерогенных рисков для здоровья человека показала, что для Северных фоновых территорий, а также для района г. Ковдора значение индекса HI равно или ниже порогового значения для питьевой воды. Для остальных районов в среднем вода непригодна для употребления внутрь, однако в каждой локации присутствуют от 27 до 81 % водоемов с низким риском возникновения неканцерогенных эффектов при указанном употреблении ($HI_{ing} < 1$). В районах L-4, L-5, L-6 и L-7 присутствуют водоемы с $HI_{derm} > 1$, и, следовательно, при воздействии воды через кожу возможен высокий риск возникновения неканцерогенных эффектов. Наиболее высокие неканцерогенные риски могут возникнуть при потреблении воды из водоемов у хвостохранилищ.

Риск рака представляет собой возможность развития любого типа онкологии на протяжении всей жизни из-за воздействия канцерогенов [Li et al., 2014]. Данный индекс риска разработан для перорального и кожного контакта с Ni, As, Cd, Cr и Pb. Рассмотрение значений индекса CR (табл. 3) при употреблении воды внутрь позволило определить, что 92 % вод из рек и озер Кольского полуострова имеют значения индекса выше приемлемого уровня. В настоящем исследовании наибольший вклад в данный показатель вносят высокие концентрации Ni, вследствие этого в районе г. Мончегорска (L-5) установлены наивысшие показатели CR. Расчет возникновения канцерогенных эффектов при воздействии воды через кожу показал, что вода в озерах на территории химического выгорания растительности (район L-5) обладает канцерогенным действием и в этом случае.

Расчет нескольких индексов загрязнения для одной и той же территории привел к разным статусам ее загрязнения. Так, водные объекты в с. Ловозеро считаются сильно загрязненными согласно HMEI, в то же время согласно HMTL они оцениваются как водоемы с умеренной токсичностью. Однако статусы загрязнения совпадают, когда водный объект испытывает сильную антропогенную нагрузку (район г. Мончегорска).

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что горнодобывающая промышленность – один из самых мощных факторов антропогенной нагрузки на природные поверхностные воды Кольского полуострова. Отмечены водоемы с экстремально высоким (до 10 ед.) и низким (3,7 ед.) рН, с низкими значениями Eh поверхностных вод (до –180 мВ), а также с высоким содержанием (до 3300 мг/л). Анализ методом атомно-абсорбционной спектроскопии показал, что основными металлами, загрязняющими воды Кольского полуострова, являются (мкг/л): Cu (до 2350), Ni (до 3420), Co (до 53), Pb (до 8,8), Cd (до 0,745), Mn (до 947), Sr (до 3080), Al (до 2120) и Fe (до 3970). Проведенный статистический анализ позволил предположить основные источники загрязнения наиболее подверженных антропогенному воздействию водоемов Кольского полуострова. Отмечена высокая токсичность загрязняющих металлов, значительный риск возникновения неканцерогенных и канцерогенных эффектов при потреблении воды. Установлено, что наиболее загрязненные токсичными металлами поверхностные воды находятся в районе г. Мончегорска, однако также следует обратить внимание на районы г. Апатиты и г. Оленегорска.

Авторы благодарят Д. С. Косякова и А. Ю. Кожевникова за возможность использования оборудования ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета.

Литература

- Даувальтер В. А. Гидрохимия озер в зоне влияния стоков производства железорудного сырья // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 1. С. 167–176. doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-167-176
- Даувальтер В. А., Даувальтер М. В. Экологическое состояние подземных вод Восточного рудника АО «Апатит» // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. Т. 16. С. 131–135. doi: 10.31241/FNS.2019.16.027
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Геоэкология озер Мурманской области: В 3 ч. Ч. 2. Гидрохимия водоемов. Мурманск: МГТУ, 2014. 222 с.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Влияние деятельности горно-металлургических предприятий на химический состав донных отложений озера Имандра, Мурманская область // Биосфера. 2015. Т. 7, № 3. С. 295–314. doi: 10.24855/biosfera.v7i3.86
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Оценка экологического состояния озера Имандра по результатам исследований химического состава донных отложений // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Мат-лы VI Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Апатиты, 10–14 октября 2016 г.). Апатиты, 2016. С. 180–185.
- Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Аккумуляция и миграция химических элементов в арктических наземных и водных экосистемах в зоне влияния выбросов комбината «Печенганикель» // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 3. С. 31–42. doi: 10.17076/lim744
- Денисов Д. Б., Валькова С. А., Терентьев П. М., Черепанов А. А., Разумовская А. В. Экологическая характеристика малых озер в зоне деятельности Мончегорской площадки АО «Кольская ГМК» // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 65–76. doi: 10.17076/lim845
- Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник / Под ред. М. М. Трофимчук. Ростов-на-Дону, 2020. 578 с.
- Кашулин Н. А., Беккелунд А. А., Даувальтер В. А., Петрова О. В. Апатитовое горно-обогатительное производство и эвтрофирование арктического озера Имандра // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3(35). С. 16–34. doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-16-34
- М 03-505-119-03. Методика количественного химического анализа. Определение металлов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках атомно-абсорбционным методом. СПб., 2003.
- Моисеенко Т. И., Кудрявцева Л. П., Гашкина Н. А. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. 261 с.
- Югай В. С., Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Содержание биодоступных форм соединений металлов в донных отложениях водоемов и коэффициент накопления (Kd) как показатели экологической обстановки водоемов (на примере озер Мурманской области) // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 591–600.
- Chowdhury S., Mazumder M. A., Alattas O., Husain T. Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries // Sci. Total Environ. 2016. Vol. 569-570. P. 476–488. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.166
- Dauvalter V. A., Dauvalter M. V., Slukovskii Z. I. The dynamics of the chemical composition of surface water in the zone of influence of North-West Phosphorous Company JSC. 5th International Conference 'Arctic: History and Modernity' // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 539. Art. 012026. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012026
- Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L. Small lakes ecosystems under the impact of non-ferrous metallurgy (Russia, Murmansk Region) // Environments. 2020. Vol. 7, no. 4. P. 29. doi: 10.3390/environments7040029
- Evshev A. V., Krasovskaya T. M. Toxic metals in soils of the Russian North // J. Geochem. Explor. 2017. Vol. 174. P. 128–131. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.05.018
- Haque A., Jewel A. S., Hasan J., Islam M., Ahmed S., Alam L. Seasonal variation and ecological risk assessment of heavy metal contamination in surface waters of the Ganges river (northwestern Bangladesh) // Mal. J. Analyt. Sci. 2019. Vol. 23, no. 2. P. 300–311. doi: 10.17576/mjas-2019-2302-14

Huffmeyer N., Klasmeier J., Matthies M. Geo-referenced modeling of zinc concentrations in the Ruhr river basin (Germany) using the model GREAT-ER // *Sci. Total Environ.* 2009. Vol. 407. P. 2296–305. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.11.055

Ji H., Li H., Zhang Y., Ding H., Gao Y., Xing Y. Distribution and risk assessment of heavy metals in overlying water, porewater, and sediments of yongding river in a coal mine brownfield // *J. Soil. Sedim.* 2018. Vol. 18, no. 2. P. 624–639. doi: 10.1007/s11368-017-1833-y

Kumar V., Parihar D. R., Sharma A., Bakshi P., Preet Singh Sidhu G., Shreeya Bali S., Karaouzas I., Bhardwaj R., Thukral A. K., Gyasi-Agyei Y., Rodrigo-Comino J. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses // *Chemosphere.* 2019. Vol. 236. Art. 124364. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124364

Li Z., Ma Z., van der Kuijp T. J., Yuan Z., Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2014. Vol. 468–469. P. 843–853. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090

Mazukhina S. I., Sandimirov S. S., Pozhilenko V. I., Gudkov A. V. The genesis of the natural water chemistry in the South-Western Khibiny Mountains (the Malaya Belaya River Basin) // *J. Environ. Sci. Heal. Part A.* 2020. Vol. 55, no. 5. P. 511–516. doi: 10.1080/10934529.2019.1710086

Moiseenko T. I., Morgunov B. A., Gashkina N. A., Megorskiy V. V., Pesiakova A. A. Ecosystem and human health assessment in relation to aquatic environment pollution by heavy metals: case study of the Murmansk Region, northwest of the Kola Peninsula, Russia // *Environ. Res. Lett.* 2018. Vol. 13, no. 6. Art. 065005. doi: 10.1088/1748-9326/aab5d2

Naymushina O., Shvartsev S., Ses K. Hydrochemistry and composition of hydrocarbons in the waters of peatlands in Western Siberia // *IERI Procedia.* 2014. Vol. 8. P. 119–124. doi: 10.1016/j.ieri.2014.09.020

Saha P., Paul B. Assessment of heavy metal toxicity related with human health risk in the surface water of an industrialized area by a novel technique // *Hum. Ecol. Risk Assess: Inter. J.* 2019. Vol. 25, no. 4. P. 966–987. doi: 10.1080/10807039.2018.1458595

Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K., Sutton D. J. Heavy metal toxicity and the environment // *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology / A. Luch (Ed.); Experientia Supplementum.* 2012. Vol. 101. P. 133–164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Zakir H. M., Sharmin S., Akter A., Rahmana S. Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: A case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh // *Environ. Adv.* 2020. Vol. 2. Art. 100005. doi: 10.1016/j.envadv.2020.100005

References

Chowdhury S., Mazumder M. A., Alattas O., Husain T. Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Sci. Total Environ.* 2016;569-570:476–488. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.166

Dauvalter V. A. Lakes hydrochemistry in the zone of influence of iron-mining industry waste waters. *Vestnik of MSTU.* 2019;22(1):167–176. doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-167-176 (In Russ.)

Dauvalter V. A., Dauvalter M. V. Ecological conditions of underground waters of the Vostochny mine of the Apatit JSC. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTS RAN = Proceedings of the Fersman Scientific Session, Geological Institute KSC RAS.* 2019;16:131–135. doi: 10.31241/FNS.2019.16.027 (In Russ.)

Dauvalter V. A., Dauvalter M. V., Slukovskii Z. I. The dynamics of the chemical composition of surface water in the zone of influence of North-West Phosphorous Company JSC. 5th International Conference 'Arctic: History and Modernity'. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020;539:012026. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012026

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Geoecology of the lakes in the Murmansk Region. Part. 2. Hydrochemistry of reservoirs. Murmansk: MGTU; 2014. 222 p. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. The influence of mining and metallurgical enterprises on the chemical composition of Lake Imandra, Murmansk Region. *Biosfera = Biosphere.* 2015;7(3):295–314. doi: 10.24855/biosfera.v7i3.86 (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Assessment of the ecological state of Lake Imandra based on the results of studies of the chemical composition of bottom sediments. *Ekologicheskie problemy severnykh regionov i puti ikh resheniya = Environmental problems of the northern regions and ways to solve them: Proceed. of the VI All-Russian scientific conference with int. participation (Apatity, October 10-14, 2016).* Apatity; 2016. P. 180–185. (In Russ.)

Dauvalter V. A., Kashulin N. A. Accumulation and migration of chemical elements in the Arctic terrestrial and aquatic ecosystems in the impact zone of emissions from the Pechenganickel company. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;3:31–42. doi: 10.17076/lim744 (In Russ.)

Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L. Small lakes ecosystems under the impact of non-ferrous metallurgy (Russia, Murmansk Region). *Environments.* 2020. Vol. 7, no. 4. P. 29. doi: 10.3390/environments7040029

Denisov D. B., Valkova S. A., Terentiev P. M., Cherepanov A. A., Razumovskaya A. V. Ecological state of small lakes in the impact zone of the Monchegorsk site of JSC 'Kolskaya GMK'. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;9:65–76. doi: 10.17076/lim845 (In Russ.)

Evseev A. V., Krasovskaya T. M. Toxic metals in soils of the Russian North. *J. Geochem. Explor.* 2017;174:128–131. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.05.018

Haque A., Jewel A. S., Hasan J., Islam M., Ahmed S., Alam L. Seasonal variation and ecological risk assessment of heavy metal contamination in surface waters of the Ganges river (northwestern Bangladesh). *Mal. J. Analyt. Sci.* 2019;23(2):300–311. doi: 10.17576/mjas-2019-2302-14

Huffmeyer N., Klasmeier J., Matthies M. Geo-referenced modeling of zinc concentrations in the Ruhr

river basin (Germany) using the model GREAT-ER. *Sci. Total Environ.* 2009;407:2296–305. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.11.055

Ji H., Li H., Zhang Y., Ding H., Gao Y., Xing Y. Distribution and risk assessment of heavy metals in overlying water, porewater, and sediments of yongding river in a coal mine brownfield. *J. Soil. Sedim.* 2018;18(2):624–639. doi: 10.1007/s11368-017-1833-y

Kashulin N. A., Bekkelund A. A., Dauvalter V. A., Petrova O. V. Apatite mining and processing production and eutrophication of the Arctic Lake Imandra. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy.* 2019;3(35):16–34. doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-16-34 (In Russ.)

Kumar V., Parihar D. R., Sharma A., Bakshi P., Preet Singh Sidhu G., Shreeya Bali S., Karaouzas I., Bhardwaj R., Thukral A. K., Gyasi-Agyei Y., Rodrigo-Comino J. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere.* 2019;236:124364. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124364

Li Z., Ma Z., van der Kuijp T. J., Yuan Z., Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Sci. Tot. Environ.* 2014;468–469:843–853. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090

M 03-505-119-03. Methods of quantitative chemical analysis. Determination of metals in drinking, mineral, natural, waste water and atmospheric precipitation by the atomic absorption method. St. Petersburg; 2003.

Mazukhina S. I., Sandimirov S. S., Pozhilenko V. I., Gudkov A. V. The genesis of the natural water chemistry in the South-Western Khibiny Mountains (the Malaya Belaya River Basin). *J. Environ. Sci. Heal. Part A.* 2020;55(5):511–516. doi: 10.1080/10934529.2019.1710086

Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Gashkina N. A. Dispersed elements in surface waters of land: Techno-

philicity, bioaccumulation, and ecotoxicology. Moscow: Nauka; 2006. 261 p. (In Russ.)

Moiseenko T. I., Morgunov B. A., Gashkina N. A., Megorskiy V. V., Pesiakova A. A. Ecosystem and human health assessment in relation to aquatic environment pollution by heavy metals: Case study of the Murmansk Region, northwest of the Kola Peninsula, Russia. *Environ. Res. Lett.* 2018;13(6):065005. doi: 10.1088/1748-9326/aab5d2

Naymushina O., Shvartsev S., Ses K. Hydrochemistry and composition of hydrocarbons in the waters of peatlands in Western Siberia. *IERI Procedia.* 2014;8:119–124. doi: 10.1016/j.ieri.2014.09.020

Saha P., Paul B. Assessment of heavy metal toxicity related with human health risk in the surface water of an industrialized area by a novel technique. *Hum. Ecol. Risk Asses: Inter. J.* 2019;25(4):966–987. doi: 10.1080/10807039.2018.1458595

Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K., Sutton D. J. Heavy metal toxicity and the environment. A. Luch (ed.) *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. Experientia Supplementum.* 2012;101:133–164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Trofimchuk M. M. (ed.). The quality of surface waters in the Russian Federation. The yearbook. Rostov-on-Don; 2020. 578 p. (In Russ.)

Yugai V. S., Dauvalter V. A., Kashulin N. A. The content of bioavailable forms of metal compounds in bottom sediments of water bodies and the accumulation coefficient (Kd) as indicators of the ecological situation of water bodies (for example, lakes in the Murmansk Region). *Vestnik MSTU.* 2013;16(3):591–600. (In Russ.)

Zakir H. M., Sharmin S., Akter A., Rahmana S. Assessment of health risk of heavy metals and water quality indices for irrigation and drinking suitability of waters: A case study of Jamalpur Sadar area, Bangladesh. *Environ. Adv.* 2020;2:100005. doi: 10.1016/j.envadv.2020.100005

Поступила в редакцию / received: 31.05.2022; принята к публикации / accepted: 30.08.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Яковлев Евгений Юрьевич

канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией экологической радиологии, ведущий научный сотрудник

e-mail: evgeny.yakovlev@fciactic.ru

Дружинина Анна Сергеевна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник

e-mail: annadruzhinina27@yandex.ru

Дружинин Сергей Валериевич

научный сотрудник

e-mail: druzhininserg@yandex.ru

Иванченко Николай Леонидович

канд. хим. наук, научный сотрудник

e-mail: ivanchenkonl@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Yakovlev, Evgeny

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Leading Researcher

Druzhinina, Anna

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

Druzhinin, Sergey

Researcher

Ivanchenko, Nikolai

Cand. Sci. (Chem.), Researcher

УДК 556.114.+574.52

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ 2019 ГОДА

Ю. В. Крылова^{1*}, Е. А. Курашов², А. М. Пономаренко¹,
Е. С. Светашова¹, М. А. Синякова^{1,3}, С. Б. Екимова¹,
Е. В. Протопопова², Е. В. Колосовская¹, В. В. Ходонович¹,
Е. Я. Явид^{1,4}, В. А. Гребенников¹, Е. М. Фисак¹, А. Ю. Романов^{1,5}

¹ Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга)

(наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, Россия, 199053), * juliakrylova@mail.ru

² Институт озераведения РАН, обособленное подразделение СПб ФИЦ РАН
(ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105)

³ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
(Лоцманская ул., 3, Санкт-Петербург, Россия, 190121)

⁴ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН,
обособленное подразделение СПб ФИЦ РАН

(14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, Россия, 199178)

⁵ Станция по борьбе с болезнями животных Всеволожского района
(Колтушское шоссе, 45, Всеволожск, Ленинградская область, 188640)

С момента увеличения антропогенной нагрузки в 1970-е годы в Ладожском озере появились зоны экологического риска, и в настоящее время необходимы мониторинговые исследования для оценки экологического состояния литоральной зоны, принимающей на себя основную антропогенную нагрузку. В данной работе оценивалось экологическое состояние вод литоральной зоны Ладожского озера по токсикологическим, гидрохимическим показателям и показателям развития фитопланктона, а также выявлялись зоны ухудшения качества воды как среды обитания гидробионтов. Для оценки экологического состояния литоральной зоны использовали следующие критерии качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения: ПДК_{вр} тяжелых металлов и нефтяных углеводородов, рН, окислительно-восстановительный потенциал, показатели развития фитопланктона, уровень трофии, показатели токсичности. Показано, что наиболее актуальными зонами экологического риска, по выбранным критериям, в настоящее время являются: в северном районе – акватории в районе залива Импилахти, мыса Умоппиуми, о. Койонсаари и о. Путсаари; из акваторий восточного берега – залив Уксунлахти и Андрусовская бухта; из акваторий южного района – Волховская губа; из акваторий западного берега – Тайполовский залив, бухта Далекая и Щучий залив. Эти акватории должны быть включены в систему экологического мониторинга Ладожского озера с ежегодным контролем токсикологических, гидрохимиче-

ских и гидробиологических параметров. Трофический статус литоральной зоны западного и южного районов Ладожского озера в 2019 г. можно охарактеризовать как слабomezотрофный, район восточного берега – как мезотрофно-эвтрофный, а район северных шхер – как мезотрофный. В целом экологическое состояние литоральной зоны Ладоги в 2019 г. можно считать более благополучным по сравнению с 2006 г.

Ключевые слова: Ладожское озеро; гидрохимическая характеристика; токсикологическая характеристика; фитопланктон; среда обитания гидробионтов; загрязнение; трофический статус

Для цитирования: Крылова Ю. В., Курашов Е. А., Пономаренко А. М., Светашова Е. С., Синякова М. А., Екимова С. Б., Протопопова Е. В., Колосовская Е. В., Ходонович В. В., Явид Е. Я., Гребенников В. А., Фисак Е. М., Романов А. Ю. Оценка экологического состояния литоральной зоны Ладожского озера по результатам исследований 2019 года // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 102–120. doi: 10.17076/lim1474

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института озераводства РАН, обособленного подразделения СПб ФИЦ РАН, по теме № 0154-2019-0001 в части исследования лимнологических параметров при помощи автоматических многопараметрических зондов Aqua Troll 500, а также фитопланктона. Результаты в части оценки ряда гидрохимических и токсикологических показателей получены в рамках государственного задания Санкт-Петербургского филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга) по темам №№ 076-00005-19-00 и 076-00005-20-02.

J. V. Krylova^{1*}, E. A. Kurashov², A. M. Ponomarenko¹, E. S. Svetashova¹, M. A. Sinyakova^{1,3}, S. B. Ekimova¹, E. V. Protopopova², E. V. Kolosovskaya¹, V. V. Khodonovich¹, E. Ya. Yavid^{1,4}, V. A. Grebennikov¹, E. M. Fisak¹, A. Yu. Romanov^{1,5}. ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE LITTORAL ZONE OF LAKE LADOGA BY THE RESULTS OF EXPEDITION RESEARCH IN 2019

¹ Saint Petersburg branch of “Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography” (“GosNIORKH” named after L.S. Berg) (26 Naberezhnaya Makarova St., 199053 St. Petersburg, Russia), *juliakrylova@mail.ru

² Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevast'yanova St., 196105 St. Petersburg, Russia)

³ St. Petersburg State Marine Technical University (3 Lotsmanskaya St., 190121 St. Petersburg, Russia)

⁴ Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences (39 14th line V.O., 199178 St. Petersburg, Russia)

⁵ Vsevolozhsky District Animal Disease Control Station (45 Koltushskoe Shosse, 188640 Vsevolozhsk, Leningrad Region, Russia)

Due to the fact that zones of ecological risk have appeared in Lake Ladoga since the increase in anthropogenic pressure in the 1970s, monitoring studies are currently needed to assess the ecological state of the littoral zone as the one that takes on the main anthropogenic load. The aim of the work was to assess the current ecological state of the waters in the littoral zone of Lake Ladoga in terms of toxicological and hydrochemical characteristics, and indicators of phytoplankton development, and to identify the most problematic zones of deterioration in water quality as a habitat for aquatic organisms. To assess the ecological state of the littoral zone, we used the following water quality criteria for water bodies of fishery importance: maximum permissible concentrations of heavy metals, petroleum hydrocarbons, pH, redox potential, indicators of phytoplankton development, trophic level, and toxicity indicators. It is shown that the areas of the most pressing environmental risk, as determined by the selected criteria, currently are: in the northern region – water areas near Impilahti Bay, Cape Umoppiumi, Kojonsaari, and Putsaari Islands; among eastern

coast water – Uksunlahti Bay and Andrusovskaya Bay; among waters in the southern region – Volkhov Bay; among western coast waters – Taipolovsky Bay, Dalyokaya Bay, and Shchuchiy Bay. These water areas should be mandatory observation areas within the environmental monitoring system of Lake Ladoga with annual monitoring of toxicological, hydrochemical, and hydrobiological parameters. Considering the trophic scales used, the littoral zone of the western and southern regions of Lake Ladoga in 2019 can be characterized as weakly mesotrophic, the area along the eastern coast as mesotrophic-eutrophic, and the northern skerries region as mesotrophic. In general, according to the data obtained, the ecological state of the littoral zone of Lake Ladoga in 2019 can be said to have improved since 13 years ago (in 2006).

Keywords: Lake Ladoga; hydrochemical characteristics; toxicological characteristics; phytoplankton; habitat of aquatic organisms; pollution; trophic status

For citation: Krylova J. V., Kurashov E. A., Ponomarenko A. M., Svetashova E. S., Sinyakova M. A., Ekimova S. B., Protopopova E. V., Kolosovskaya E. V., Khodonovich V. V., Yavid E. Ya., Grebennikov V. A., Fisak E. M., Romanov A. Yu. Assessment of the ecological state of the littoral zone of Lake Ladoga by the results of expedition research in 2019. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 102–120. doi: 10.17076/lim1474

Funding. The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Limnology RAS, a separate division of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, on topic No. 0154-2019-0001 in terms of studying limnological parameters using automatic multi-parameter probes Aqua Troll 500, as well as phytoplankton. The results in terms of evaluating a number of hydrochemical and toxicological indicators were obtained as part of the state task of the St. Petersburg Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography» (GosNIORKh n.a. L. S. Berg) on topics No. 076-00005-19-00 and No. 076-00005-20-02.

Введение

Ладожское озеро является крупнейшим европейским пресноводным водоемом и одним из самых значимых и жизненно важных геостратегических природных объектов Северо-Запада России [Ладога..., 2013]. Для оценки экологического состояния и эффективного управления его экосистемой необходимо проводить мониторинговые исследования среды обитания гидробионтов, поскольку ее состояние является результатом взаимодействия природных и антропогенных факторов. В связи с этим необходимо учитывать особенности различных участков акватории озера, используя в арсенале средств оптимальный и информативный перечень гидрохимических, токсикологических и гидробиологических параметров. Литоральная зона озера первая подвергается воздействию антропогенных факторов, причем как биогенной нагрузки, вызывающей эвтрофирование, так и различных категорий загрязнителей, в том числе и токсичных веществ, существенно ухудшающих условия среды обитания гидробионтов [Литоральная..., 2011]. Литоральная зона является, по сути, своеобразным барьером между водосбором и основной акваторией озера, принимая на себя вещества различной природы, в том числе загрязнители, и вместе с тем

это зона наиболее интенсивного протекания химических и биологических процессов [Литоральная..., 2011]. Оценка гидрохимических, токсикологических и гидробиологических параметров, отражающих последствия воздействия антропогенных факторов, позволяет установить местоположение и степень воздействия источников эвтрофирования и загрязнения, т. е. выявить так называемые «горячие точки» [Андроникова, Распопов, 2007]. В пелагиали и бентали озера за пределами литоральной зоны распределение веществ происходит в соответствии с морфометрией водоема и особенностями протекания гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов [Гусаков, Тержевик, 1992; Петрова и др., 2010], при этом хроническое загрязнение литоральной зоны как части лимнической прибрежной зоны [Гусаков, Тержевик, 1992] со временем может приводить к ухудшению среды обитания гидробионтов всего озера.

Цель работы заключалась в оценке экологического состояния вод литоральной зоны Ладожского озера по токсикологическим, гидрохимическим характеристикам и показателям развития фитопланктона и выявлении зон ухудшения качества воды, «зон экологического риска» [Андроникова, Распопов, 2007], как среды обитания гидробионтов.

Материалы и методы

Сбор полевого материала осуществлен во время комплексной экспедиции на Ладожское озеро, проведенной в августе–сентябре 2019 г. в рамках совместных мониторинговых исследований Ладожского озера Институтом озероведения РАН, ГосНИОРХом и Управлением ветеринарии Ленинградской области.

Станции отбора проб в литоральной зоне озера находились в пределах нескольких десятков метров от береговой линии с глубиной не более одного метра и обозначены на рисунке. В таблицах 1, 3–5 и 7 также даны описания исследованных станций.

Пробы воды отбирались с глубины 0,3 м батометром Руттнера. Измерение ряда лимнологических параметров производилось *in situ* с помощью автоматических многопараметрических зондов Aqua Troll 500. Зондами определялись следующие параметры: глуби-

на, температура, электропроводность, общая минерализация, концентрация растворенного кислорода, процент насыщения кислородом, pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП). Датчик pH в зонде Aqua Troll 500 скомбинирован с датчиком Eh, и диапазон ОВП по шкале Eh составляет ± 1400 мВ.

Определение общего и минерального фосфора и ионов аммония осуществлялось на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ по стандартным методикам [РД..., 2009, 2019а, б].

Токсикологические показатели, наряду с гидрохимическими, являются основой для оценки состояния среды обитания гидробионтов, в том числе и такого звена экосистемы, как рыбное население. В качестве оценочных критериев использовались нормативы качества воды и предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения ПДК_{вр} [Приказ..., 2020].

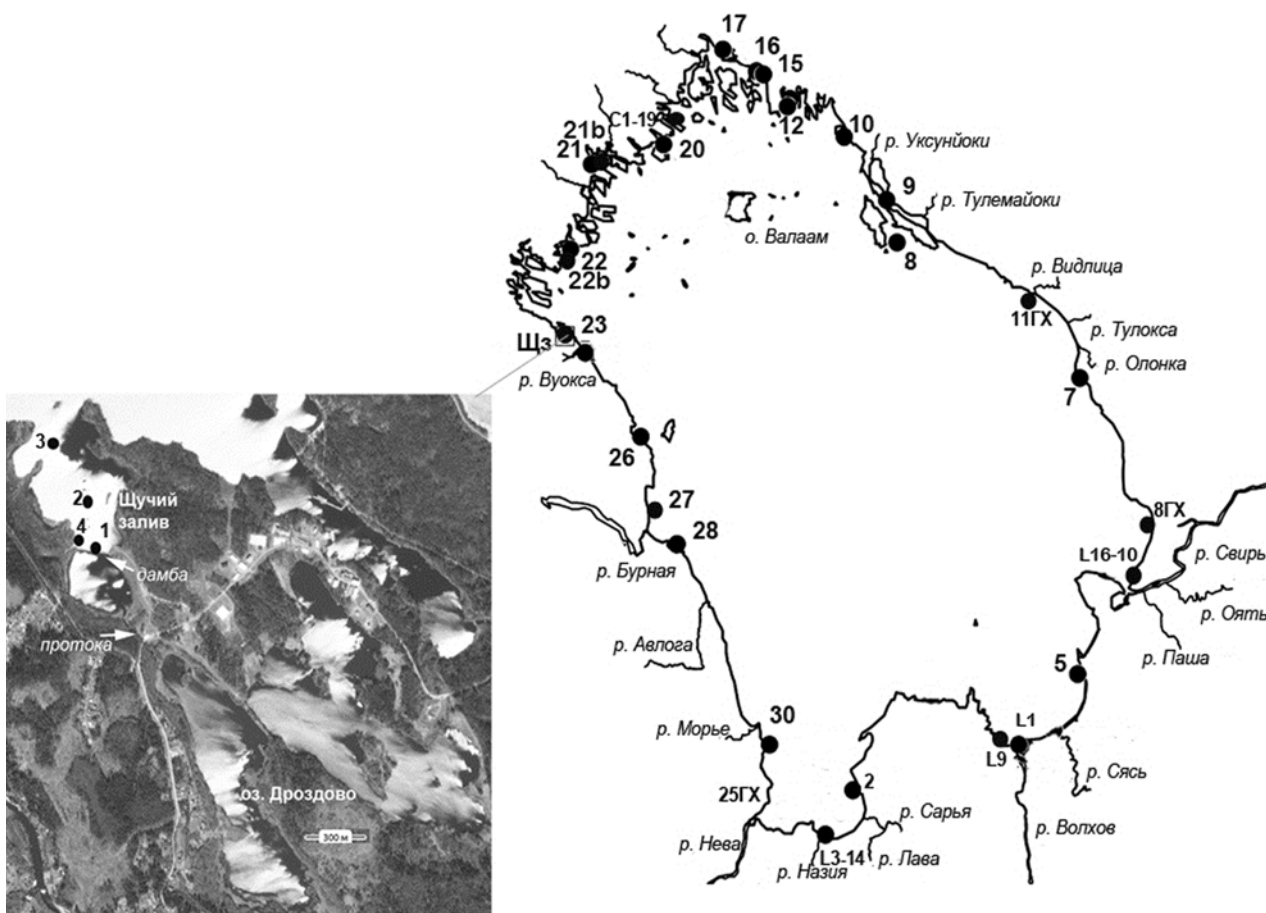


Схема станций отбора проб в прибрежной зоне Ладожского озера (картографические данные Яндекс <https://yandex.ru/maps/>).

Scheme of the sampling stations in the coastal zone of Lake Ladoga (Yandex map data <https://yandex.ru/maps/>)

В перечень определяемых токсикологических параметров входили нормируемые тяжелые металлы (ТМ) (кадмий, свинец, медь, марганец), нефтяные углеводороды (НУВ) и показатели острой и хронической токсичности по тест-объекту *Daphnia magna* Straus.

Анализ содержания ТМ в воде осуществлялся атомно-абсорбционным методом на приборе AA-7000 (Shimadzu) по методикам [ПНД Ф..., 2010; М 02-2406-13..., 2013], а также методом инверсионной вольтамперометрии на приборе АВА-2 по методике ПНД Ф 14.1:2:4.63-96 [Количественный..., 2010].

Содержание НУВ в пробах определяли методом ИК-спектрофотометрии на приборе АН-2 по утвержденной методике [ПНД Ф..., 2011].

Токсичность воды оценивали с использованием тест-объекта – ветвистоусого ракообразного *D. magna* в лабораторных условиях по методике ФР.1.39.2007.03222, допущенной для целей государственного экологического контроля, разработанной ООО «Акварос» [Биологические..., 2007]. Острые опыты (кратковременное биотестирование) позволяют оценить токсичность представленной пробы уже через 96 часов по выживаемости тест-организмов. Показатель выживаемости – среднее количество дафний, выживших в тестируемой пробе за определенное время. Критерием острой токсичности является гибель 50 % и более дафний за период до 96 часов в тестируемой пробе по сравнению с контролем.

Хроническое биотестирование использовали в варианте наблюдения за тест-объектом *D. magna* в течение 20 дней и более, что дает возможность выявить влияние тестируемой пробы как на сам тест-объект (дафний), так и на его потомство (по срокам вымета, количеству и жизнестойкости молоди).

Уровень трофии исследованных участков озера оценивали по содержанию общего фосфора с использованием критериев Б. Карлсона [Carlson, 2007] и биомассе фитопланктона [Китаев, 1984, 2007]. Методика отбора и исследования проб фитопланктона описана в статье Е. А. Курашова с соавторами [2018].

В связи с тем, что в изучаемом регионе концентрации некоторых элементов, обусловленные природным фоном, могут быть достаточно высоки, для выявления особо загрязненных зон в качестве ориентира использовались средние медианные значения (СМЗ) исследуемых параметров. Сравнительные заключения были сделаны для четырех районов исследования: северный (шхерный), восточный, южный и западный. В пределах каждого района существуют зоны, мало подверженные антропо-

погенному воздействию, а также ранее выявлялись зоны с повышенной антропогенной нагрузкой [Литоральная..., 2011].

Результаты и обсуждение

В таблицах 1, 3–5 и 7 приведены данные по оцененным параметрам, а также представлена информация о наличии высшей водной растительности и наиболее актуальных внешних признаках (как, например, очень интенсивное развитие цианобактерий на ст. 12), дополнительно характеризующих исследованные местообитания. Эта информация полезна и при интерпретации результатов для учета антагонизма в развитии фитопланктона и макрофитов, в том числе при потреблении ими фосфора в процессе фотосинтеза. Полученные данные по электропроводности и минерализации в таблицах не приводятся, так как они соответствовали определенным ранее [Литоральная..., 2011]. Также не приводятся данные по кислороду, поскольку кислородный режим на всех станциях был благоприятный (более 95 % насыщения). Результаты исследования фитопланктона приведены в таблице 2.

Следует упомянуть, что токсикологические исследования ни в одном из исследованных местообитаний не выявили острой токсичности в отношении тест-объекта *D. magna*.

В северном (шхерном) районе (табл. 1) по совокупности данных самыми неблагоприятными с точки зрения антропогенного влияния следует признать акватории у залива Импилахти, у мыса Умоппиуми и о. Койонсаари. В частности, залив Импилахти загрязняется в результате поступления коммунально-бытовых сточных вод поселка и осуществления хозяйственной деятельности. Выявленная хроническая токсичность по выживаемости как норматив качества воды объектов рыбохозяйственного значения указывает на плохое качество воды данной акватории и, следовательно, неблагоприятную среду для обитания гидробионтов. Здесь обнаружена самая высокая концентрация общего фосфора, что указывает на эвтрофный статус акватории.

Высокое содержание НУВ (превышение в 4 раза ПДК_{вр}) (табл. 1) может быть связано как с внеклеточной продукцией водорослей, так и с нефтяным загрязнением. Такой вывод напрашивается в связи с тем, что данная концентрация вышла за пределы СМЗ концентрации НУВ в озере в 2019 г., как открытых его районов [Крылова и др., 2020], так и литоральной

Таблица 1. Концентрация кадмия, свинца, меди, марганца, общего фосфора, минерального фосфора (Cd, Pb, Cu, Mn, P_{общ}, P_{мин}, мкг/л), нефтяных углеводородов (НУВ, мг/л), показатель хронической токсичности (ХТ) на *D. magna* (I – не оказывает действия; II – оказывает по выживаемости; III – оказывает по плодovitости), pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП, мВ), численность фитопланктона (N_{фито}, тыс. кл./л), общая характеристика биотопа (ОХБ) в северном (шхерном) районе Ладожского озера летом 2019 г.

Table 1. The concentration of cadmium, lead, copper, manganese, total phosphorus, mineral phosphorus (Cd, Pb, Cu, Mn, P_{tot}, P_{min}, µg/l), petroleum hydrocarbons (PH, mg/l), index of chronic toxicity (CT) for *D. magna* (I – has no effect; II – has a survival effect; III – has a fertility effect), pH, redox potential (ORP, mV), phytoplankton abundance (N_{phyto}, thousand cells/l), general characteristics of the biotope (GCB) in the northern (skerry) region of Lake Ladoga in summer 2019

№ станции Station no.	Место-положение Location	Cd	Pb	Cu	Mn	НУВ PH	ХТ CT	P _{общ} /P _{мин} P _{tot} /P _{min}	pH	N _{фито} N _{phyto}	ОВП ORP	ОХБ GCB
10	г. Питкяранта, в проливе напротив завода Pitkyaranta town, in the strait opposite the plant	0,2	0,1	1,2	6,9	0,41	I	34/6	8,3	2026	250	илистая литораль с большим количеством растительных остатков; хвощ, рдесты, элодея и т.д. muddy littoral with a large amount of plant remains; horsetail, pondweeds, elodea, etc.
12	Выход из зал. Импилахти Output of Impilahti Bay	0,1	0,6	1,3	5,5	0,20	II	82/10	9,55	95320	224	тростник на песке, интенсивное развитие цианобактерий reed on the sand, intensive development of cyanobacteria
15	Около пос. Ляскеля Near the Lyaskela Village	0,1	4,4	1,5	6,2	0,04	I	32/7	7,59	3492	311	заиленный песок с растительными остатками, тростник, горец, рдесты silted sand with plant debris, reed, smartweed, pondweed
16	Мыс Умоппиуми Cape Umoppiumi	0,1	0,7	3,5	7,9	0,06	III	15/3	7,93	4992	300	тростник, камни, ил, растительные остатки reeds, stones, silt, plant debris
17	Залив у п-ова Рауталаhti Bay near Rautalahti Peninsula	0,1	1,5	1,8	7,8	0,04	I	70/2	7,54	2160	264	тростник, камни reed, stones
20	Западный берег о. Путсаари West coast of the Putsaari Island	0,1	0,2	1,6	4,9	0,04	III	82/21	8,07	7312	278	песчаная литораль, хвощ, ситняг, горец sandy littoral, horsetail, spike-rush, smartweed
21	Якимварский зал., пос. Сорола Yakimvarsky Bay, Sorola village	0,1	0,2	2,8	9,0	0,04	I	30/2	8,17	4252	234	тростник на глинистом грунте; reed on clay bottom

Окончание табл. 1
Table 1 (continued)

№ станции Station no.	Место- положение Location	Cd	Pb	Cu	Mn	НУВ PH	ХТ СТ	$\frac{P_{\text{общ}}}{P_{\text{мин}}}$ $\frac{P_{\text{tot}}}{P_{\text{мин}}}$	pH	$N_{\text{фито}}$ $N_{\text{рфито}}$	ОВП ORP	ОХБ GCB
21b	Якимварский зал., пос. Сорола Yakimvarsky Bay, Sorola village	⁵ BDL	0,1	1,4	11,8	0,05	I	20/2	8,21	6708	240	илистая литораль, хвощ, горец muddy littoral, horsetail, smartweed
Ст.21 (2)	г. Лахденпохья Lahdenpohja city	0,1	0,1	1,6	7,3	0,04	III	38/1	7,61	-	249	тростник на глинистом грунте reed on clay bottom
22	Напротив о. Койонсаари Opposite Koionsaari Island	-	-	-	-	-	-	-	7,84	6514	302	тростник, дерновина reed, tussock
22b	Напротив о. Койонсаари Opposite Koionsaari Island	0,1	1,1	1,8	6,3	0,05	II, III	41/5	7,95	5944	294	песок, ситняг sand, spike-rush
C1-19	Сортавальские шхеры Sortavala skerries	0,1	0,7	2,8	4,1	-	I	4/2	7,19	676	303	мелкий заиленный песок с глиной, <i>P. perfoliatus</i> fine silted sand with clay, <i>P. perfoliatus</i>
	¹ СМЗ ¹ М	0,1	0,7	1,8	7,8	0,04	-	34/3	7,92	4581	278	
	² ПДК ₉₀ /другой критерий ² МРС / another criterion	5	6	1	10	0,05	-	³ С	6,5–8,5	⁴ NN	⁴ NN	

Примечание. ¹ Среднее медианное значение по данному району озера; ² предельно допустимая концентрация в воде водоемов рыбохозяйственного значения; ³ С – градации трофии по концентрации общего фосфора [Carlson, 2007]: 0–0,012 – олиготрофные водоемы; 0,012–0,024 – мезотрофные; 0,024–0,096 – эвтрофные; «-» – анализ не проводился; ⁴ NN – показатель не нормируется; ⁵ BDL – ниже предела обнаружения.

Note. ¹ Average median value for this area of the lake; ² maximum permissible concentration in water of reservoirs of fishery significance; ³ C – trophic gradations of water bodies by the concentration of total phosphorus [Carlson, 2007]: 0–0.012 – oligotrophic water bodies; 0.012–0.024 – mesotrophic; 0.024–0.096 – eutrophic; «-» – analysis was not performed; ⁴ NN – indicator is not standardized; ⁵ BDL – below detection limit.

зоны (0,05 мг/л), и за пределы средних многолетних значений [Щербак, 2013].

В заливе Импилахти обнаружена самая высокая численность фитопланктона (доля цианобактерий составила свыше 90 %), что более чем на порядок выше по сравнению с другими станциями шхерного района. Кроме того, здесь зафиксирована очень высокая численность микроорганизмов, что характерно для грязных вод [Митрукова и др., 2020].

Очень высокое значение pH (9,55) связано с гиперинтенсивным развитием фитопланктона, а самое низкое значение ОВП в шхерном районе свидетельствует о низкой скорости окисления органического вещества. На выхо-

де из зал. Импилахти также выявлена максимальная по сравнению с другими участками доля палочковидных клеток (57 %) [Митрукова и др., 2020], что косвенно подтверждает опять же присутствие большого количества органического вещества [Кожова, Дутова, 1989; Киреева, 2007; Копылов, Косолапов, 2007].

Менее неблагоприятными, по сравнению с заливом Импилахти, следует признать акваторию у мыса Умоппиуми и у о. Путсаари. Но и в этих районах обнаружена хроническая токсичность по плодовитости дафний и высокая численность бактериопланктона [Митрукова и др., 2020], что говорит о большом количестве органического вещества, в составе которого

могли быть и токсичные соединения. У мыса Умоппиуми выявлено превышение ПДК_{вр} меди в 3,5 раза. У о. Путсаари обнаружена одна из самых высоких концентраций общего фосфора, соответствующая эвтрофному статусу, самое высокое содержание минерального фосфора (табл. 1) и высокое количество сапрофитных бактерий (184 КОЕ/мл) [Митрукова и др., 2020]. Перечисленные факты могут быть связаны с антропогенным эвтрофированием в результате хозяйственно-бытовой и туристической деятельности на острове.

В проливе напротив целлюлозно-бумажного завода г. Питкяранта (ЦБЗ) обнаружена самая высокая концентрация НУВ (превышение ПДК_{вр} в 8,2 раза). При этом в данном местообитании значения рН были близки к средним по озеру. Данное обстоятельство наряду с незначительным развитием фитопланктона свидетельствует о том, что высшая водная растительность, интенсивно развивающаяся здесь, будучи своеобразным фильтром и антагонистом развития фитопланктона, является основным источником НУВ. Одновременно с этим нельзя полностью исключать возможное техногенное загрязнение от ЦБЗ и хозяйственно-бытовое с прилегающих городских территорий как источник НУВ. Кроме того, на этой акватории обнаружена высокая численность сапрофитных (1000 КОЕ/мл) и колиформных (46 КОЕ / 100 мл) бактерий [Митрукова и др., 2020]. Перечисленные факты свидетельствуют, что в акваторию вблизи г. Питкяранты поступают сточные воды ЦБЗ и коммунально-бытовые сточные воды.

Известно, что в 2014 г. концентрация НУВ выше 0,2 мг/л была обнаружена на некоторых локальных участках прибрежной части Ладожского озера [Игнатьева и др., 2015]. Ранее [Щербак, 2013] в прибрежной зоне также отмечалось высокое содержание НУВ вблизи устьев рек и локальных источников загрязнения.

В Якимварском заливе (ст. 21b) (табл. 1) обнаружена концентрация марганца выше средних медианных значений как в литоральной зоне 2019 г., так и озера в целом [Крылова и др., 2020].

Таким образом, данные по фитопланктону, фосфору, микробиологии и показателям хронической токсичности показывают, что в перечисленных подверженных антропогенному влиянию акваториях северного (шхерного) района присутствует загрязнение, содержащее в том числе токсичные формы органического вещества, от промышленных, сельскохозяйственных или хозяйственно-бытовых сточных вод, являющихся трудноокисляемыми.

Самыми чистыми местами шхерного района с точки зрения оценки по токсикологическим и гидрохимическим параметрам можно назвать акватории в Якимварском заливе и в районе ст. С1-19 (Сортавальские шхеры) (табл. 1). В последнем случае зафиксированы олиготрофные условия по содержанию фосфора и развитию фитопланктона (табл. 1, 2).

В целом северный район литоральной зоны Ладожского озера по медианному значению концентрации фосфора в период наблюдений соответствовал эвтрофному статусу (табл. 1). В то же время по фитопланктону трофический статус почти всех станций района (за исключением ст. 12) (табл. 2) соответствовал либо мезотрофному, либо олиготрофному при медианном значении 1,05 г/м³ (граница мезо- и олиготрофии). Если учесть, что развитие фитопланктона в литоральной зоне может ограничиваться не только биогенными элементами, но и другими факторами, например, аллелопатическим воздействием со стороны макрофитов [Kurashov et al., 2021; Zhu et al., 2021], а в состав общего фосфора входят не только его формы, обеспечивающие развитие фотосинтезирующих организмов, то, вероятнее всего, трофический тип биотопа (или целой акватории) следует принять как некое промежуточное состояние между результатами этих способов оценки степени трофии. Таким образом, трофический тип литоральной зоны северного района Ладожского озера может быть определен как мезотрофный.

В восточном районе литоральной зоны (табл. 3) по совокупности имеющихся данных самым неблагоприятным для среды обитания гидробионтов следует признать залив Уксунлахти, где обнаружена хроническая токсичность по выживаемости и плодовитости тест-объекта *D. magna*. Здесь отмечается самая высокая концентрация нефтяных углеводородов (превышение ПДК_{вр} в 4 раза) и ионов аммония 0,26 мг/л с учетом того, что СМЗ содержания ионов аммония было ниже 0,01 мг/л. В акватории залива Уксунлахти столь высокая концентрация ионов аммония указывает на большое количество разлагающегося органического вещества. На большинстве других исследованных станций этот показатель изменялся от < 0,01 до 0,045 мг/л. Относительно высокие значения концентрации ионов аммония (0,056 и 0,058 мг/л) были также отмечены во Владимирской бухте (ст. 26, западный район) и заливе Рауталахти (ст. 17, северные шхеры). При этом ни на одной из этих станций содержание ионов аммония не превысило ПДК_{вр} = 0,4 мг/л.

Таблица 2. Показатели развития фитопланктона на исследованных литоральных станциях в Ладожском озере
 Table 2. Indicators of phytoplankton development at the investigated littoral stations in Lake Ladoga

Район озера Lake area	Станции Stations	Количество видов Number of species	Биомасса, г/м ³ Biomass, g/m ³	Численность, тыс. кл./л Number, thousand cells/l
Северный (шхерный) Northern (skerry)	10	19	1,25	2026
	12	33	7,65	95320
	15	30	0,99	3492
	16	21	1,05	4992
	17	20	0,79	2160
	C1-19	14	0,45	676
	20	25	1,98	7312
	21	18	1,61	4252
	21b	21	2,17	6708
	22	24	0,81	6514
	22b	25	0,93	5944
	СМЗ _р M _г	21	1,05	4992
	Восточный Eastern	8 гх	21	1,4
L-16-10		22	1,26	2014
7		22	0,62	1512
8		21	2,08	3672
9		29	2,51	4464
СМЗ _р M _г		22	1,67	2843
Южный Southern	L1	29	1,43	7408
	2	27	1,39	6148
	L-3-14	18	1,28	4698
	5	28	0,86	2441
	30	29	0,85	3460
	L-9	32	0,97	4104
	СМЗ _р M _г	28	1,13	4401
Западный Western	26	21	1,03	7564
	27	34	1,23	3876
	28	28	0,6	1486
	23	28	1,07	2824
	Щучий (дамба) Shchuchiy (dam)	35	3,91	15844
	Щучий (центр) Shchuchiy (center)	39	4,09	18536
	Щучий (выход) Shchuchiy (outlet)	43	4,26	18772
	Щучий (литораль) Shchuchiy (littoral)	32	2,60	14172
СМЗ _р M _г	33	1,92	10868	
Медиана по всей литоральной зоне озера Median over the entire littoral zone of the lake		26	1,26	4581

Примечание. СМЗ_р – медианное значение по району.

Note. M_г – median in a given region.

Таблица 3. Оцененные характеристики в восточном районе Ладожского озера летом 2019 г.

Table 3. Estimated characteristics in the eastern region of Lake Ladoga in summer 2019

№ станции Station no.	Местоположение Location	Cd	Pb	Cu	Mn	НУВ PH	ХТ CT	$P_{\text{общ}} / P_{\text{мин}}$ $P_{\text{tot}} / P_{\text{min}}$	pH	$N_{\text{фито}}$ N_{phyto}	ОВП ORP	ОХБ GCB
L16-10	Свирская губа, устье р. Свирь Svirskaja Bay, Mouth of the Svir River	0,1	1,1	1,3	1,3	0,04	I	31/4	7,44	2014	237	тростник на песке reed at the sand
7	Андрусовская бухта Andrusovskaja Bay	0,1	0,8	2,3	5,8	0,04	III	38/5	7,9	1512	256	тростник, камни, песок reed, stones, sand
8	У о. Мантсинсаари Mantsinsaari Island	0,1	0,2	1,3	6,0	0,04	I	70/2	7,67	3672	270	тростник, камни, песок reed, stones, sand
8гх	Восточный берег Свирской губы East coast of Svirskaja Bay	0,1	0,5	2,2	6,2	0,08	I	4/2	8,22	5556	169	песок sand
9	Зал. Уксунлахти Uksunlahti Bay	0,1	2,0	1,2	7,9	0,20	II, III	29/2	8,07	4464	278	тростник, плотная дерновина, песок reed, dense tussock, sand
	¹ СМЗ ¹ М	0,1	0,7	1,8	7,8	0,04		31/2	7,92	4581	278	
	² ПДК _{вр} / другой критерий ² МРС / another criterion	0,005	0,006	0,001	0,01	0,05		³ С	6,5–8,5	⁴ NN	⁴ NN	

Примечание. Здесь и в табл. 4, 5 и 7 – обозначения как в табл. 1.

Note. Here and Tables 4, 5 and 7 – designations as in Table 1.

Кроме того, в заливе Уксунлахти показатель численности фитопланктона был ниже медианного значения по всей литоральной зоне озера (табл. 2). Данное обстоятельство указывает на то, что, как и на акватории вблизи г. Питкяранта (табл. 1), антропогенный вклад в содержание НУВ может быть весьма значителен. На акваторию залива Уксунлахти могут оказывать влияние сточные воды предприятий и хозяйств, расположенных на р. Уксун.

На втором месте по степени неблагополучия находится Андрусовская бухта. Здесь выявлена хроническая токсичность тест-объекта *D. magna* по плодовитости.

В устье р. Свирь зафиксировано незначительное превышение ПДК_{вр} по марганцу. Есть основание полагать, что на ст. 8ГХ в Свирской губе периодически поступают воды с различными органическими загрязнителями, поскольку выявлено самое низкое значение ОВП среди всех исследованных литоральных биотопов. Здесь же была обнаружена самая большая численность сапрофитных бактерий –

415 КОЕ/мл [Митрукова и др., 2020] и фитопланктона из всех исследованных станций литоральной зоны восточной части озера.

Несмотря на известный факт, что в водосборном бассейне р. Свирь интенсивно развита хозяйственная деятельность, наши результаты не позволяют отнести акваторию ее устья к особо загрязненным участкам. Вероятнее всего, сильное разбавление и течения в устье р. Свирь препятствуют возникновению застойных процессов, поскольку это открытый залив со сложной системой течений.

Участок у о. Мантсинсаари следует отнести к числу сильно эвтрофируемых, поскольку здесь отмечена высокая концентрация общего фосфора (70 мкг/л, табл. 3). При этом токсическое загрязнение зафиксировано не было, что свидетельствует о достаточно благоприятном экологическом состоянии этой акватории.

На всех перечисленных акваториях восточного района Ладожского озера, за исключением района пляжа Свирской губы, концентрация общего фосфора соответствовала эвтрофному уровню.

В то же время степень развития фитопланктона в литоральных биотопах восточного берега, как и в случае с северным районом, указывает на более низкий трофический уровень восточного района (табл. 2). Минимальные численность и биомасса фитопланктона наблюдались в районе Андрусовской бухты (ст. 7), а максимальные – в заливе Уксунлахти (ст. 9) (табл. 2). Биомасса фитопланктона колебалась от 0,66 до 2,51 г/м³, т. е. в диапазоне от олиготрофного до мезотрофного состояния. СМЗ этого показателя было несколько выше, чем в северном районе (1,67 против 1,05 г/м³), и соответствовало мезотрофному уровню. По численности на всех станциях восточного района преобладали представители Cyanophyta (37–49 % от общей численности фитопланктона). По совокупной характеристике видового состава, уровня развития фитопланктона и концентрации общего фосфора

трофический статус литоральной зоны восточного берега Ладожского озера можно охарактеризовать как мезотрофно-эвтрофный.

В южном районе на акватории б. Петрокрепость превышений ПДК_{вр} по тяжелым металлам не выявлено (табл. 4). Вместе с тем следует отметить превышение СМЗ кадмия в районе пос. Назия в 4 раза. Превышение показателя ПДК_{вр} по НУВ скорее можно связать с интенсивным развитием фотосинтезирующих организмов. Это хорошо подтверждается как значениями рН, так и численностью и биомассой водорослей. В районе мыса Осиновец, дер. Кобона и пос. Назия по численности преобладали преимущественно цианобактерии (20–71 % от общей численности водорослей), золотистые (до 60 %) и криптофитовые водоросли (до 29 %). Максимальная суммарная биомасса фитопланктона, как и численность, наблюдалась в районе дер. Кобона.

Таблица 4. Оцененные характеристики в бухте Петрокрепость (южный район) Ладожского озера летом 2019 г.
Table 4. Estimated characteristics in the Petrokrepost Bay (southern region) of Lake Ladoga in summer 2019

№ станции Station no.	Местоположение Location	Cd	Pb	Cu	Mn	НУВ PH	рН	N _{фито} N _{phyto}	ОВП ORP	ОХБ GCB
30	Мыс Осиновец Cape Osinovets	⁵ BDL	0,7	2,0	10,8	0,05	8,56	3460	319	песок с камнями на глине, тростник, рдесты sand with stones on clay, reeds, pondweed
2	Дер. Кобона, налево от выхода из канала Cobona Village, left of the canal entrance	0,1	0,6	1,0	10,2	0,06	7,86	6148	339	тростник на песке, интенсивное развитие фитопланктона reeds at the sand intensive development of phytoplankton
L3-14	Пос. Назия Nazia Village	0,4	0,1	1,0	2,8	0,08	8,1	4698	334	мелкий песок, тростник, преобладают с-з fine sand, reeds, dominated n-w
	¹ СМЗ ¹ М	0,1	0,7	1,8	7,8	0,04	7,92	4581	278	
	² ПДК _{вр} ² МРС	5	6	1	10	0,05	6,5–8,5	⁴ NN	⁴ NN	

На акватории в районе мыса Осиновец вклад в увеличение НУВ может быть и от биологически активных веществ (низкомолекулярных метаболитов) рдестов и другой погруженной водной растительности, обильно здесь развивающейся.

На трех станциях – мыс Осиновец, дер. Кобона и пос. Назия (табл. 4) – зафиксированы одни из самых высоких по озеру значений ОВП

(319, 339, 334 мВ соответственно), что свидетельствует о хорошей очистительной способности биотопов акватории бухты Петрокрепость, и ее можно признать достаточно благополучной экологически.

Следует учитывать, что межгодовая изменчивость концентраций металлов по акватории озера определяется как неоднородностью поступления их с водосбора, так и гидродинамиче-

скими условиями в озере. Повышенные их концентрации чаще всего приурочены к районам впадения крупных притоков, особенно выделяется Волховская губа, принимающая загрязненные воды р. Волхов [Сусарева, Петрова, 2013].

По данным 2019 г., в Волховской губе наблюдаются повышенные концентрации марганца и меди. Концентрация меди в 2019 г. значительно возросла по сравнению с 2017 и 2018 гг. [Крылова и др., 2020].

На акватории Волховской губы наблюдалась следующая картина. В устье Волхова (ст. L1) концентрация марганца в 5 раз превы-

сила ПДК_{вр} и в 6 раз СМЗ; концентрация меди в 10 раз превысила ПДК_{вр} и в 5 раз СМЗ; концентрация свинца превысила СМЗ в 2 раза (табл. 5). К западу и востоку от устья р. Волхов (ст. 3 (L9) и 5) наблюдалось снижение концентраций марганца по отношению к станции, расположенной в устье р. Волхов, в 10 и 3 раза соответственно (табл. 5). По меди и свинцу к западу от устья отмечено снижение в 11 и 3 раза соответственно. К востоку от ст. L1 концентрация меди была примерно такая же (в 5 раз выше СМЗ), а по свинцу наблюдалось снижение в 6,5 раза по отношению к устью.

Таблица 5. Оцененные характеристики в Волховской губе (южный район) Ладожского озера летом 2019 г.
Table 5. Estimated characteristics in the Volkhov Bay (southern region) of Lake Ladoga in the summer of 2019

№ станции Station no.	Местоположение Location	Cd	Pb	Cu	Mn	НУВ PH	ХТ CT	$\frac{P_{\text{общ}}}{P_{\text{tot}}} / \frac{P_{\text{мин}}}{P_{\text{min}}}$	pH	$N_{\text{фито}}$ N_{phyto}	ОВП ORP	ОХБ GCB
L1	Устье Волхова Mouth of the Volkhov	⁵ BDL	1,3	13	49,5	0,04	I	23/ 2	7,63	7408	323	песок, рдесты, тростник, полупогруженная растительность sand, pondweed, reed, semi-submerged vegetation
3 (L9)	К западу от устья Волхова West to the mouth of the Volkhov	⁵ BDL	0,4	1,2	4,8	0,04	I	17/ 1	7,88	4104	300	песок, малочисленные рдесты sand, scattered pondweed
5	Восточная часть Волховской губы Eastern part of the Volkhov Bay	⁵ BDL	0,2	10,4	18,1	0,07	I	24/ 2	8,5	2441	302	песок, тростник, погруженная растительность sand, reeds, submerged vegetation
	¹ СМЗ ¹ М	0,1	0,7	1,8	7,8	0,04		23/2	7,92	4581	278	
	² ПДК _{вр} / другой критерий ² МРС / another criterion	0,005	0,006	0,001	0,01	0,05		³ С	6,5–8,5	⁴ NN	⁴ NN	

Высокие значения ОВП в Волховской губе (табл. 5) указывают на активное протекание окислительных реакций и высокую самоочищающую способность водных масс этого района Ладоги.

Содержание общего фосфора в Волховской губе было на уровне мезотрофно-эвтрофного статуса (табл. 5). СМЗ общего фосфора в Волховской губе соответствовало его СМЗ в пелагиали озера в 2019 г. [Крылова и др., 2021], что, скорее всего, было связано на момент от-

бора проб с гидросиноптической обстановкой в озере. Это обусловлено тем, что при ветрах южных направлений концентрации фосфора в литоральной зоне в первую очередь зависят от влияния р. Волхов, воды которой богаты соединениями этого биогенного элемента [Ладога..., 2013], а при ветрах северных направлений Волховская губа заполняется водами открытой части озера, и тогда концентрация фосфора мало отличается от среднеозерных [Петрова, Игнатьева, 2021].

Таблица 6. Диапазон изменения (под чертой) и средние (над чертой) величины биомассы (мг/л) литорального фитопланктона в бухте Петрокрепость и Волховской губе Ладожского озера летом 2006, 2014 и 2019 гг.
 Table 6. The range of variation (below the line) and average (above the line) biomass values (mg/l) of littoral phytoplankton in Petrokrepost Bay and Volkhov Bay of Lake Ladoga in the summer of 2006, 2014, and 2019

Районы озера Lake areas	2006 г.	2014 г.	2019 г.
Бухта Петрокрепость Petrokrepost Bay	<u>1,72</u> 1,58–1,86	<u>0,93</u> 0,38–1,49	<u>1,04</u> 0,64–1,39
Волховская губа Volkhov Bay	<u>0,78</u> 1,66–1,90	<u>2,58</u> 1,27–5,54	<u>0,81</u> 0,39–1,43

При рассмотрении средних значений биомассы фитопланктона различных районов южной части Ладожского озера в межгодовом аспекте установлено, что в бухте Петрокрепость эти величины в 2014 и 2019 гг. примерно в 1,5 раза ниже, чем в 2006 г. (табл. 6).

В Волховской губе колебание полученных средних значений биомассы фитопланктона выражено сильнее, чем в бухте Петрокрепость (минимальная и максимальная величины различаются примерно в три раза), и не имеет определенной тенденции (табл. 6). По видовому составу фитопланктона и шкале трофности [Китаев, 1984, 2007] южный район литоральной зоны Ладожского озера в 2019 г. можно охарактеризовать как слабomezотрофный.

Вдоль западного берега самыми неблагоприятными по токсикологическим параметрам оказались Тайполовский залив и бухта Далекая (табл. 7), где выявлена хроническая токсичность воды по плодовитости *D. magna*. В бухте Далекой также отмечено превышение ПДК_{вр} НУВ в 1,8 раза при низких значениях рН и численности фитопланктона, что говорит об антропогенной составляющей НУВ. Не исключено влияние на акваторию Тайполовского залива животноводческих агропромышленных комплексов (поселки Запорожское, Петровское и Громово Приозерского района Ленинградской области), на что может указывать обнаруженная здесь высокая численность бактериопланктона и колиформных бактерий [Митрукова и др., 2020], а также высокая концентрация общего фосфора, соответствовавшая статусу эвтрофного водоема (табл. 7).

В Щучьем заливе хроническая токсичность воды не выявлена. Самым проблемным участком следует считать акваторию у дамбы. Там обнаружена наиболее высокая концентрация марганца (превышение ПДК_{вр} в 2,6 раза), что, возможно, связано с постоянным подтоком загрязненных вод через искусственно прорытый канал из оз. Дроздово. На станциях 2 и 4 кон-

центрации марганца уже несколько ниже, чем у дамбы, и численность сапрофитных бактерий уменьшается по мере удаления от нее [Митрукова и др., 2020], что также подтверждает предположение о постоянном подтоке загрязненных вод к дамбе из оз. Дроздово и их дальнейшем проникновении через дамбу в залив.

На станциях 1, 2, 3 Щучьего залива зафиксированы достаточно высокие значения ОВП (227, 219, 227 мВ соответственно), однако они ниже, чем в благополучных по экологическому состоянию районах озера. Высокие значения рН были связаны с интенсивным развитием фитопланктона (табл. 5) и в некоторой степени, на станциях 1 и 2, с развитием макрофитов. Высокая концентрация НУВ (в 6 раз выше ПДК_{вр}) в центре Щучьего залива может быть следствием активного развития криптофитовых водорослей и рдестов (в основном *Potamogeton perfoliatus* L.).

За пределами Щучьего залива на других станциях западного побережья наблюдалось содержание фосфора, соответствовавшее как олиготрофным, так и эвтрофным условиям, что, очевидно, может быть связано с наличием или отсутствием локальных источников эвтрофирования. Значения биомассы фитопланктона находились на границе олиготрофного и мезотрофного статуса.

При рассмотрении средних значений биомассы фитопланктона в межгодовом аспекте (табл. 8) обнаружено, что для западного берега эти величины в 2014 и 2019 гг. практически одинаковы. В районе восточного берега средние величины биомассы фитопланктона близки для 2006 и 2019 гг. Для северных шхер средние биомассы всех трех лет исследований фактически идентичны. Это указывает на стабильность среднего уровня развития литорального фитопланктона Ладожского озера в течение последних 15 лет, в целом не выходящего за пределы мезотрофного статуса.

СМЗ содержания общего фосфора, полученное в 2019 г. в целом для литоральной зоны,

Таблица 7. Оцененные характеристики в западном районе Ладожского озера летом 2019 г.

Table 7. Estimated characteristics in the western region of Lake Ladoga in the summer of 2019

№ станции Station no.	Местоположение Location	Cd	Pb	Cu	Mn	НУВ РН	ХТ СТ	$P_{\text{общ}} / P_{\text{мин}}$ $P_{\text{tot}} / P_{\text{min}}$	pH	ОВП ORP	$N_{\text{фито}}$ N_{phyto}	ОХБ GCB
23	Приозерск, устье р. Вуоксы, залив у завода Priozersk, the mouth of Vuoksa River, a bay near the plant	0,1	0,7	2,9	10,5	0,04	I	47/2	7,32	302	2824	тростник на песке reed at the sand
26	Бухта Владимирская Vladimirskaya Bay	0,1	0,7	2,4	12,4	0,04	I	5/4	9,12	210	7564	песчаная заиленная литораль, рдесты, <i>Persicaria amphibia</i> , разнообразная погруженная растительность sandy silted littoral, pondweeds, <i>Persicaria amphibia</i> , diverse submerged vegetation
27	Тайполовский залив Taipolovsky Bay	0,1	0,7	2,4	12,5	0,03	III	63/3	7,52	299	3876	тростник на песке reed at the sand
28	Бухта Далекая Dalyokaya Bay	-	-	-	-	0,09	III	6/2	7,18	255	1486	тростник на песке, камни, дерновина reed at the sand, stones, tussock
Щучий залив Shchuchiy Bay	Ст. 1 (дамба) St. 1 (Dam)	0,1	0,6	2,0	25,6	0,05	I	* 31/3	9,37	227	15844	заиленный песок с растительными остатками silted sand with plant residues
	Ст. 2 (центр) St. 2 (Center)	0,1	0,6	1,0	23,4	0,30	I	* 25/4	9,43	219	18536	заиленный песок, <i>P. perfoliatus</i> silted sand, <i>P. perfoliatus</i>
	Ст. 3 (выход) St. 3 (Entrance)	⁵ BDL	0,6	2,0	10,9	0,05	I	* 25/4	9,38	227	18772	песок sand
	Ст. 4 (литораль) St. 4 (Littoral)	⁵ BDL	1,2	1,0	24,5	0,05	I	* 20/4	9,49	280	14172	заиленный песок, <i>Elodea canadensis</i> silted sand, <i>Elodea canadensis</i>
¹ СМЗ ¹ М		0,1	0,7	1,8	7,8	0,04	-	27/3,5	7,92	278	4581	
² ПДК _{вр} / другой критерий ² МРС / another criterion		0,005	0,006	0,001	0,01	0,05	-	³ С	6,5–8,5	⁴ NN	⁴ NN	

Примечание. *Данные получены в результате съемки в ноябре 2019 г.

Note. *Data obtained from a survey in November 2019.

Таблица 8. Диапазон изменения (под чертой) и средние (над чертой) величины биомассы (мг/л) литорального фитопланктона в районах открытых берегов и северных шхер Ладожского озера летом 2006, 2014 и 2019 гг.

Table 8. The range of variation (below the line) and average (above the line) biomass values (mg/l) of littoral phytoplankton in the areas of open shores and northern skerries of Lake Ladoga in the summer of 2006, 2014, and 2019

Районы озера Lake areas	2006 г.	2014 г.	2019 г.
Западный берег Western coast	<u>1,92</u> 0,38–6,65	<u>0,78</u> 0,68–0,95	<u>0,95</u> 0,60–1,23
Восточный берег Eastern coast	<u>2,04</u> 0,21–4,13	<u>0,80</u> 0,72–0,89	<u>1,73</u> 0,62–2,50
Северные шхеры Northern skerries	<u>2,0</u> 0,69–5,58	<u>1,69</u> 0,47–5,38	<u>1,66</u> 0,45–7,65

хотя и соответствовало эвтрофному статусу (31 мкг Р/л), но было существенно ниже, чем в 2006 г. (56 мкг Р/л) [Игнатъева, Сусарева, 2011]. Данный факт указывает на то, что ситуация за 13 лет изменилась в лучшую сторону относительно эвтрофирования литоральной зоны. При этом средние значения концентраций общего фосфора в основной водной массе Ладожского озера остаются достаточно близкими на уровне мезотрофного статуса, а именно, в августе 2019 г. СМЗ $P_{\text{общ}}$ было 24 мкг Р/л; в августе и сентябре 2020 г. – 14 и 21 мкг Р/л соответственно [Крылова и др., 2021]. В воде деклинальной лимнической зоны концентрация общего фосфора с 2006 по 2018 г. составила 11–17 мкг Р/л [Петрова, Игнатъева, 2021].

При сравнении результатов исследований в Щучьем заливе в 2006 и 2019 гг. получено, что ранее этот участок литоральной зоны озера характеризовался более высоким трофическим статусом. СМЗ концентрации общего фосфора в 2006 г. было 121 мкг Р/л [Игнатъева, Сусарева, 2011], а в 2019 г. – 25 мкг Р/л, что почти в 5 раз меньше.

Анализ данных показал, что в 2019 г. в северном и северо-западном районе литоральной зоны Ладожского озера концентрации общего фосфора в среднем были в 1,5 раза выше, а в восточном, южном, северо-восточном и западном районе, исключая Щучий залив, примерно в 2 раза ниже по сравнению с данными тринадцатилетней давности [Игнатъева, Сусарева, 2011]. Это указывает в большей степени на снижение антропогенной фосфорной нагрузки на литоральную зону озера в целом.

Таким образом, с учетом использованных нами шкал трофности [Китаев, 1984, 2007; Carlson, 2007] литоральную зону западного и южного районов Ладожского озера в 2019 г. можно охарактеризовать как слабomezотрофную, район восточного берега – как мезотроф-

но-эвтрофный, а район северных шхер – как мезотрофный.

Заключение

Оценка экологического состояния литоральной зоны Ладожского озера, проведенная в 2019 г. с использованием комплекса различных параметров, позволила получить характеристику трофического состояния различных районов литоральной зоны, а также показала, что в пределах этих районов могут находиться отдельные локальные участки с повышенным трофическим статусом. Наряду с эвтрофированием актуальной проблемой зачастую является и антропогенное загрязнение. К наиболее актуальным зонам экологического риска [Андроникова, Распопов, 2007], испытывающим повышенное антропогенное воздействие и выявленным по критериям качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в настоящее время относятся: в северном районе – акватории около залива Импилахти, мыса Умппиуми, о. Койонсаари и о. Путсаари; вдоль восточного берега – залив Уксунлахти и Андрусовская бухта; из акваторий южного района – Волховская губа; западного берега – Тайполовский залив, бухта Далекая и Щучий залив. Под вопросом остается современное экологическое состояние Монастырской губы на о. Ваалам, т. к. она нами не исследована. Однако ранее сообщалось о крайне неблагоприятном ее состоянии [Литоральная..., 2011]. Данные акватории должны быть обязательными зонами наблюдения в рамках системы экологического мониторинга Ладожского озера с ежегодным контролем токсикологических, гидрохимических и гидробиологических параметров.

В целом экологическое состояние литоральной зоны Ладоги в 2019 г. можно считать более благоприятным, чем 13 лет назад (в 2006 г.).

Литература

Андроникова И. Н., Распопов И. М. Зоны экологического риска в прибрежных районах Ладожского озера // Биология внутренних вод. 2007. № 2. С. 3–10.

Биологические методы контроля. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний. ФР 1.39.2007.03222. М.: Акварос, 2007. 52 с.

Гусаков Б. Л., Тержевик А. Ю. Лимническое районирование и особенности озерных процессов в лимнических зонах // Ладожское озеро – критерии состояния экосистемы / Ред. Н. А. Петрова, А. Ю. Тержевик. СПб.: Наука, 1992. С. 21–26.

Игнатьева Н. В., Петрова Т. Н., Гусева М. А. Оценка загрязненности поверхностных вод на территории водосборного бассейна Ладожского озера по гидробиологическим показателям // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 6. С. 91–96.

Игнатьева Н. В., Сусарева О. М. Особенности гидрохимического режима прибрежной зоны озера // Литоральная зона Ладожского озера / Ред. Е. А. Курашова. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 45–51.

Киреева И. Ю. Морфобиологические и структурные показатели бактериопланктона как биоиндикаторы // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: Сб. матер. междунар. конф. (Санкт-Петербург, 23–27 окт. 2007 г.). СПб., 2007. С. 191–193.

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 395 с.

Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М., 1984. 207 с.

Кожова О. М., Дутова Н. В. Морфологическое разнообразие планктонных бактерий как показатель качества вод // Гидробиологический журнал. 1989. Т. 25, № 1. С. 42–48.

Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ионов меди, свинца, кадмия в пробах питьевых, природных и сточных вод методом инверсионной вольтамперометрии. Екатеринбург: НПВП «ИВА», 2010. 20 с.

Копылов А. И., Косолапов Д. Б. Микробиологические индикаторы эвтрофирования пресных водоемов // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: Сб. матер. междунар. конф. (Санкт-Петербург, 23–27 окт. 2006 г.). СПб., 2007. С. 176–181.

Крылова Ю. В., Светашова Е. С., Екимова С. Б., Пономаренко А. М., Курашов Е. А., Синякова М. А., Ляшенко Г. Ф., Колосовская Е. В., Фисак Е. М., Ходонович В. В., Явид Е. Я., Аршаница Н. М., Романов А. Ю. Оценка современного экологического состояния Ладожского озера по токсикологическим и гидрохимическим показателям // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: Материалы VII Всероссийской конференции по водной экотоксикологии, посвященной памяти

Б. А. Флёрова (16–18 сентября 2020 г.). Борок, 2020. С. 106–109.

Крылова Ю. В., Светашова Е. С., Пономаренко А. М., Екимова С. Б., Курашов Е. А., Синякова М. А., Ляшенко Г. Ф., Колосовская Е. В., Аршаница Н. М., Фисак Е. М., Ходонович В. В., Явид Е. Я., Гребенников В. А., Романов А. Ю. Токсикологическая характеристика среды обитания биологических ресурсов в Ладожском озере // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев, Ш. Р. Поздняков, В. А. Румянцев. СПб.: РАН, 2021. С. 432–439.

Курашов Е. А., Барбашова М. А., Дудакова Д. С., Капустина Л. Л., Митрукова Г. Г., Русанов А. Г., Аleshina Д. Г., Иофина И. В., Протопопова Е. В., Родионова Н. В., Трифонова М. С. Экосистема Ладожского озера: современное состояние и тенденции ее изменения в конце XX – начале XXI в. // Биосфера. 2018. Т. 10, № 2. С. 66–121. doi: 10.24855/biosfera.v10i2.439

Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.

Литоральная зона Ладожского озера / Ред. Е. А. Курашов. СПб.: Нестор-История, 2011. 416 с.

М 02-2406-13. Методика количественного химического анализа. Определение металлов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках атомно-абсорбционным методом. СПб., 2013. 29 с.

Митрукова Г. Г., Капустина Л. Л., Курашов Е. А. Экологическая оценка качества вод литоральной зоны Ладожского озера по результатам микробиологических исследований // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 88–100. doi: 10.17076/lim1277

Петрова Н. А., Петрова Т. Н., Сусарева О. М., Иофина И. В. Особенности эволюции экосистемы Ладожского озера под влиянием антропогенного эвтрофирования // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 580–589.

Петрова Т. Н., Игнатьева Н. В. Биогенные элементы // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцева. СПб.: РАН, 2021. С. 270–287.

ПНД Ф 14.1:2:4.139-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ионов меди, свинца, кадмия в пробах питьевых, природных и сточных вод методом инверсионной вольтамперометрии. Екатеринбург: НПВП «ИВА», 2010. 20 с.

ПНД Ф 14.1:2:4.5-95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в питьевых, поверхностных и сточных водах методом ИК-спектрометрии. М.: ФЦАО, 1995. (Изд-е 2011 г.). 18 с.

Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 «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 изм. и доп.). М., 2020. 217 с.

РД 52.24.486-2009. Массовая концентрация аммиака и ионов аммония в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с реактивом Несслера. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГУ ГХИ, 2009. 40 с.

РД 52.24.387-2019. Массовая концентрация фосфора общего и фосфора валового в водах. Методика измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГХИ, 2019. 28 с.

РД 52.24.382-2019. Массовая концентрация фосфатного фосфора в водах. Методика измерений фотометрическим методом. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГХИ, 2019. 31 с.

Сусарева О. М., Петрова Т. Н. Металлы // Ладoga. СПб.: Нестор-История, 2013. С. 222–226.

Щербак В. А. Нефтяные углеводороды // Ладoga. СПб.: Нестор-История, 2013. С. 227–234.

Carlson R. E. Estimating trophic state // *LakeLine*. 2007. Vol. 27, no. 1. P. 25–28.

Kurashov E., Krylova J., Protopopova E. The use of allelochemicals of aquatic macrophytes to suppress the development of cyanobacterial “blooms” // *Intech-Open*. 2021. doi: 10.5772/intechopen.95609

Zhu X., Dao G., Tao Y., Zhan X., Hu H. A review on control of harmful algal blooms by plant-derived allelochemicals // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 401. Art. 123403. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.1234

References

Andronikova I. N., Raspopov I. M. Zones of ecological risk in the coastal areas of Lake Ladoga. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology*. 2007;2:3–10. (In Russ.)

Biological control methods. Methods for determining the toxicity of water and water extracts from soils, sewage sludge, waste by mortality, and changes in fertility of daphnia. FR 1.39.2007.03222. Moscow: Aquaros; 2007. 52 p. (In Russ.)

Carlson R. E. Estimating trophic state. *LakeLine*. 2007;27(1):25–28.

Gusakov B. L., Terzhevnik A. Yu. Limnic regionalization and features of lacustrine processes in limnic zones. *Ladozhskoe ozero – kriterii sostoyaniya ekosistemy = Lake Ladoga – criteria for the state of the ecosystem*. St. Petersburg: Nauka Publ.; 1992. P. 21–26. (In Russ.)

Ignat'eva N. V., Petrova T. N., Guseva M. A. Evaluation of surface water pollution in the drainage basin of Lake Ladoga by hydrochemical indicators. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;17(6):91–96. (In Russ.)

Ignat'eva N. V., Susareva O. M. Features of the hydrochemical regime of the coastal zone of the lake. *Litoral'naya zona Ladozhskogo ozera = Littoral zone of Lake Ladoga*. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ.; 2011. P. 45–51. (In Russ.)

Kireeva I. Yu. Morphobiological and structural indicators of bacterioplankton as bioindicators. *Bioindikatsiya v monitoringe presnovodnykh ekosistem: Sb. mater. mezhdunar. konf. (Sankt-Peterburg, 23–27 okt. 2007 g.) = Bioindication in monitoring freshwater ecosystems: Proceedings of the international conference (St. Petersburg, 23–27 October 2006)*. St. Petersburg; 2007. P. 191–193. (In Russ.)

Kitaev S. P. Ecological bases of bioproductivity of lakes of different natural zones. Moscow; 1984. 207 p. (In Russ.)

Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 395 p. (In Russ.)

Kopylov A. I., Kosolapov D. B. Microbiological indicators of eutrophication of fresh water bodies. *Bioindikatsiya v monitoringe presnovodnykh ekosistem: Sb. mater. mezhdunar. konf. (Sankt-Peterburg, 23–27 okt. 2007 g.) = Bioindication in monitoring freshwater ecosystems: Proceedings of the international conference (St. Petersburg, 23–27 October 2006)*. St. Petersburg; 2007. P. 176–181. (In Russ.)

Kozhova O. M., Dutova N. V. Morphological diversity of planktonic bacteria as an indicator of water quality. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Hydrobiological Journal*. 1989;25(1):42–48. (In Russ.)

Krylova Yu. V., Svetashova E. S., Ekimova S. B., Ponomarenko A. M., Kurashov E. A., Sinyakova M. A., Lyashenko G. F., Kolosovskaya E. V., Fisak E. M., Khodonovich V. V., Yavid E. Ya., Arshanitsa N. M., Romanov A. Yu. Assessment of the current ecological state of Lake Ladoga by toxicological and hydrochemical indicators. *Antropogennoe vliyanie na vodnye organizmy i ekosistemy: Materialy VII Vserossiiskoi konferentsii po vodnoi ekotoksikologii, posvyashch. pamyati B. A. Florova (16–18 sentyabrya 2020g.) = Proceedings of the VII All-Russian Conference on Aquatic Ecotoxicology, dedicated to the memory of B. A. Flyorov = “Anthropogenic impact on aquatic organisms and ecosystems” (September 16–18, 2020)*. Borok, 2020. P. 106–109. (In Russ.)

Krylova Yu. V., Svetashova E. S., Ponomarenko A. M., Yekimova S. B., Kurashov E. A., Sinyakova M. A., Lyashenko G. F., Kolosovskaya E. V., Arshanitsa N. M., Fisak E. M., Khodonovich V. V., Yavid E. Ya., Grebennikov V. A., Romanov A. Yu. Toxicological characteristics of the habitat of biological resources in Lake Ladoga. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate*. St. Petersburg: RAS; 2021. P. 432–439. (In Russ.)

Kurashov E. A., Barbashova M. A., Dudakova D. S., Kapustina L. L., Mitrukova G. G., Rusanov A. G., Aleshina D. G., Iofina I. V., Protopopova E. V., Rodionova N. V., Trifonova M. S. The ecosystem of Lake Ladoga: current state and trends of its change in the late XX - early XXI century. *Biosfera = Biosphere*. 2018;10(2): 66–121. doi: 10.24855/biosfera.v10i2.439 (In Russ.)

Kurashov E. A., ed. The littoral zone of Lake Ladoga. St. Petersburg: Nestor-History Publ.; 2011. 416 p. (In Russ.)

Kurashov E., Krylova J., Protopopova E. The use of allelochemicals of aquatic macrophytes to suppress the development of cyanobacterial "blooms". *Intech-Open*. 2021. doi: 10.5772/intechopen.95609

M 02-2406-13. Quantitative chemical analysis technique. Determination of metals in drinking, mineral, natural, waste water and precipitation by the atomic absorption method. St. Petersburg; 2013. 29 p. (In Russ.)

Mitrukova G. G., Kapustina L. L., Kurashov E. A. Ecological assessment of water quality in the littoral zone of Lake Ladoga based on the results of microbiological studies. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre of the RAS*. 2020;9:88–100. doi: 10.17076/lim1277 (In Russ.)

Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016 N 552 "On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies" (with amendments and additions). Moscow; 2020. 217 p. (In Russ.)

Petrova N. A., Petrova T. N., Susareva O. M., Iofina I. V. Features of the evolution of the ecosystem of Lake Ladoga under the influence of anthropogenic eutrophication. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(5):580–589. (In Russ.)

Petrova T. N., Ignat'eva N. V. Biogenic elements. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate*. St. Petersburg: RAS; 2021. P. 270–287. (In Russ.)

PND F 14.1:2:4.139-98. Quantitative chemical analysis of waters. Methods for measuring the mass concentration of ions of copper, lead, cadmium in samples of drinking, natural and waste water by stripping

voltammetry. Ekaterinburg: NPVP "IVA" LLC; 2010. 20 p. (In Russ.)

PND F 14.1:2:4.5-95. Quantitative chemical analysis of waters. Methods for measuring the mass concentration of oil products in drinking, surface and waste waters by IR spectrometry. Moscow: FTSAO; 1995. (Edition 2011). 18 p. (In Russ.)

Quantitative chemical analysis of waters. Methods for measuring the mass concentration of ions of copper, lead, cadmium in samples of drinking, natural and waste water by stripping voltammetry. Ekaterinburg: NPVP "IVA"; 2010. 20 p. (In Russ.)

RD 52.24.486-2009. Mass concentration of ammonia and ammonium ions in waters. Method for performing measurements by the photometric method with Nessler's reagent. Rostov-on-Don: Roshydromet, GU GKHI; 2009. 40 p. (In Russ.)

RD 52.24.387-2019. Mass concentration of total phosphorus and total phosphorus in waters. Photometric measurement technique after oxidation with potassium persulfate. Rostov-on-Don: Roshydromet, GKHI; 2019. 28 p. (In Russ.)

RD 52.24.382-2019. Mass concentration of phosphate phosphorus in waters. Photometric measurement technique. Rostov-on-Don: Rosgidromet, GKHI; 2019. 31 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A., eds. *Ladoga*. St. Petersburg: Nestor-History Publ.; 2013. 468 p. (In Russ.)

Susareva O. M., Petrova T. N. *Metals. Ladoga*. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2013. P. 222–226. (In Russ.)

Shcherbak V. A. *Oil hydrocarbons. Ladoga*. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ.; 2013. P. 227–234. (In Russ.)

Zhu X., Dao G., Tao Y., Zhan X., Hu H. A review on control of harmful algal blooms by plant-derived allelochemicals. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;401:123403. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.1234

Поступила в редакцию / received: 02.08.2021; принята к публикации / accepted: 03.02.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Крылова Юлия Викторовна

канд. геогр. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

e-mail: juliakrylova@mail.ru

Курашов Евгений Александрович

д-р биол. наук, профессор, руководитель лаборатории гидробиологии ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН; главный научный сотрудник СПб филиала «ВНИРО»

e-mail: evgeny_kurashov@mail.ru

Пономаренко Анна Михайловна

канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: kafischem@yandex.ru

Светашова Екатерина Симоновна

канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: sveteka007@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Krylova, Juliya

Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Leading Researcher

Kurashov, Evgenii

Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Hydrobiology Laboratory; Chief Researcher

Ponomarenko, Anna

Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Svetashova, Ekaterina

Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher

Синякова Мария Александровна

канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: kafischem@yandex.ru

Екимова Светлана Борисовна

главный специалист
e-mail: ekimova771@yandex.ru

Протопопова Елена Викторовна

научный сотрудник лаборатории гидробиологии
e-mail: ephyto@mail.ru

Колосовская Елизавета Владимировна

ведущий специалист
e-mail: 3050120@mail.ru

Ходонович Влада Вячеславовна

специалист
e-mail: vapity94@mail.ru

Явид Елизавета Ярославовна

специалист
e-mail: sunnysummer@bk.ru

Гребенников Виктор Андреевич

рыбовод
e-mail: vpauk@mail.ru

Фисак Елена Максимовна

специалист
e-mail: black-and-white16@yandex.ru

Романов Алексей Юрьевич

специалист СПб филиала ВНИРО;
заведующий Региональным центром
эпизоотического и экологического мониторинга
Ладожского озера СББЖ Всеволожского района
e-mail: negan94@yandex.ru

Sinyakova, Maria

Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher

Ekimova, Svetlana

Chief Specialist

Protopopova, Elena

Researcher at Hydrobiology Laboratory

Kolosovskaya, Elizaveta

Leading Specialist

Khodonovich, Vlada

Specialist

Yavid, Elizaveta

Specialist

Grebennikov, Viktor

Pisciculturist

Fisak, Elena

Specialist

Romanov, Aleksei

Specialist at VNIRO St. Petersburg Branch;
Director, Regional Center for Epizootic and Environmental
Monitoring of Lake Ladoga, Vsevolozhsky District Animal
Disease Control Station

УДК 582.232/.275:574.586:556.52/.55(470.2)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗООПЛАНКТОНА НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ УКСУНЙОКИ (СЕВЕРНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ)

Д. Г. Алешина^{1*}, Е. А. Курашов², М. А. Гусева², Т. Н. Петрова²

¹ Татарский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ТатарстанНИРО) (ул. Александра Попова, 4а, Казань, Республика Татарстан, Россия, 420029), *dinaaleshina_21@gmail.com

² Институт озероведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105)

Исследовано зоопланктонное сообщество нижнего течения одного из притоков северного побережья Ладожского озера – реки Уксунйоки с целью изучить его современное состояние как важного структурно-функционального звена лотической экосистемы, оценить качество воды на основании его показателей и установить, какие факторы влияют на его развитие. По материалам наблюдений в 2011–2016 гг. установлено, что сообщество зоопланктона включает 53 таксона рангом ниже рода, среди них Rotifera – 16, Cladocera – 31, Copepoda – 6. Впервые для водотока отмечены 26 видов и подвидов зоопланктеров. В р. Уксунйоки выявлены одни из самых низких количественных показателей развития зоопланктона среди других притоков Ладожского озера, которые были одновременно исследованы в весенний, летний и осенний сезоны 2011–2016 гг. Численность изменялась от 10 до 2740 экз./м³, биомасса – от 0,0001 до 0,0330 г/м³. Максимальное значение количественных показателей отмечено в сентябре 2013 г. Наибольшие за сезон средние значения видового богатства, численности и биомассы зафиксированы в летний период. Весной по численности преобладали Copepoda, представленные науплиальными и копеподидными стадиями Cyclopoidea, летом и осенью наибольшее значение в структуре зоопланктона по численности и биомассе имели ракообразные группы Cladocera из семейства Chydoridae. В трофической структуре зоопланктонного сообщества преобладали организмы, добывающие пищу с поверхности субстрата, – ползающие-плавающие вторичные фильтраторы. Из факторов водной среды в р. Уксунйоки наиболее значимыми для развития зоопланктона, по-видимому, являются ионный состав воды и расход воды. Воды р. Уксунйоки по показателям сообщества зоопланктона можно охарактеризовать как условно чистые, пригодные для всех видов водопользования.

Ключевые слова: лотическая система; численность; биомасса; качество воды; сапробность; гидрохимические показатели

Для цитирования: Алешина Д. Г., Курашов Е. А., Гусева М. А., Петрова Т. Н. Современное состояние зоопланктона нижнего течения реки Уксунйоки (Северное Приладожье) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 121–132. doi: 10.17076/lim1580

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № FMNG-2019-0001.

D. G. Aleshina^{1*}, E. A. Kurashov², M. A. Guseva², T. N. Petrova². CURRENT STATE OF ZOOPLANKTON IN THE LOWER COURSE OF THE UKSUNJOKI RIVER (NORTHERN LADOGA REGION)

¹ Tatar branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography («TatarstanNIRO») (4a Alexander Popov St., 420029 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia), *dinaaleshina_21@gmail.com

² Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevast'yanova St., 196105 St. Petersburg, Russia)

The zooplankton community of the lower course of a stream draining to the Lake Ladoga northern coast – the Uksunjoki river was studied to estimate its current state as an essential structural and functional element of this lotic ecosystem, to assess the water quality based on zooplankton indicators and to determine what factors influence its development. Surveys in 2011–2016 showed the zooplankton community to include 53 taxa below the genus level, among them Rotifera – 16, Cladocera – 31, Copepoda – 6. During the surveys, 26 species and subspecies of zooplankton were recorded for the first time for this watercourse. Zooplankton quantities in the Uksunjoki were among the lowest among other 20 tributaries of Lake Ladoga during the spring, summer, and autumn seasons. The abundance varied from 10 to 2740 ind./m³, biomass from 0.0001 to 0.0330 g/m³. Quantitative indicators reached a maximum in September 2013. The highest season-averaged values of species richness, abundance, and biomass occurred in the summer period. In spring, Copepoda prevailed, represented by the naupliar and copepodite stages of Cyclopoida. In summer and autumn, cladoceran crustaceans from the family Chydoridae featured the largest numbers and biomass in the structure of the zooplankton community. Organisms that forage from the substrate surface (crawling-floating secondary filter feeders) predominated in the trophic structure of the zooplankton community. The development of species was stochastic. The most significant aquatic environment factors for the development of zooplankton in the Uksunjoki appear to be the water ionic composition and water discharge. As indicated by the zooplankton community, the water of the Uksunjoki River can be characterized as relatively clean and suitable for all types of water use.

Keywords: lotic system; abundance; biomass; water quality; saprobity; hydrochemical indicators

For citation: Aleshina D. G., Kurashov E. A., Guseva M. A., Petrova T. N. Current state of zooplankton in the lower course of the Uksunjoki River (Northern Ladoga region). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 121–132. doi: 10.17076/lim1580

Funding. The study was carried out under state assignment to the Institute of Limnology RAS – St. Petersburg Research Centre RAS within the theme #FMNG-2019-0001.

Введение

Река Уксунйоки является одним из притоков Ладожского озера и представляет собой водоток с расширениями в виде проточных озер длиной 121 км, водосборной площадью 1080 км², озерностью 6 %, заболоченностью территории 9 %, средним расходом воды за год 15 м³/с [Каталог..., 2001]. Водосборный бассейн этой озерно-речной системы лежит на гранито-гнейсовых коренных породах Фенноскандии – на кристаллическом Балтийском щите. Эта сильно (до 88 %) облесенная территория южной части Республики Карелия имеет слабое хозяйственное освоение. В нижнем течении водоток порожистый, поэтому активно используется в туристических целях.

Исследование зоопланктона реки началось Карельским отделением ГОСНИОРХ в 1965 г. с целью рыбохозяйственного освоения малых озер в верхнем течении [Куликова, 2012]. В литературе имеются данные исследований зоопланктона 4 рек и 25 озер в водосборном бассейне озерно-речной системы Уксунйоки [Рыжков, 1999; Рябинкина и др., 2012; Куликова, 2012, 2013; Комулайнен и др., 2016, 2017].

Река Уксунйоки служит источником водоснабжения для двух населенных пунктов Северного Приладожья, обеспечивает естественную среду для нереста и воспроизводства популяции атлантического лосося Ладожского озера [Антонов, 2003] и озерной форели [Рыжков, 1999]. Экосистема притока северного побережья – р. Уксунйоки – нуждается в постоянном

мониторинге, поскольку наряду с другими реками водосборного бассейна оказывает на Ладогу непосредственное влияние, в том числе на его гидробиоценозы [Расплетина и др., 2006; Trifonova et al., 2007; Комулайнен и др., 2016; Лозовик и др., 2017]. Кроме того, что зоопланктон является важным звеном водных экосистем, сообщество коловраток и ракообразных – хороший индикатор состояния водоема [Андрионикова, 1996].

Цель данной работы – изучить зоопланктонное сообщество нижнего течения р. Уксунйоки как важного структурно-функционального звена лотической экосистемы, оценить качество воды на основании его показателей и установить, с какими факторами среды взаимосвязано его развитие.

Материалы и методы

Исследование зоопланктона проводили в 2011–2016 гг. на станции в нижнем течении реки Уксунйоки в районе пос. Уксуу (61°30'01" с.ш. 31°36'00" в.д.).

Питание реки Уксунйоки происходит по смешанному типу, воды имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав. В таблице 1 представлены основные физико-химические показатели воды в нижнем течении водотока. Как и в предыдущие годы [Расплетина и др., 2006], в 2011–2016 гг. для нижнего течения реки были характерны одни из самых низких среди рек в частном водосборном бассейне Ладожского озера содержание общего фосфора, металлов, минерализация и амплитуда ее колебания (табл. 1)

Таблица 1. Основные физико-химические показатели воды и содержание хлорофилла *a* в нижнем течении р. Уксун

Table 1. The main physico-chemical indicators of water and chlorophyll *a* content in the downstream of the Uksun River

Показатели* Indicators*	Медиана Median	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Коэффициент вариации Coefficient of variation
Susp	2,7	0,1	6,3	1,05
Chr	152	73	344	0,49
$P_{\text{общ}}$ P_{tot}	0,018	0,012	0,076	0,84
$N_{\text{общ}}$ N_{tot}	0,6	0,4	0,7	0,28
TOC	10,9	7,5	20,6	0,37
HCO_3^-	4,6	0,7	9,3	0,64
Cl^-	1,8	1,0	4,5	0,54
SO_4^{2-}	2,9	1,8	3,8	0,25
Ca^{2+}	2,4	1,6	4,3	0,32
Mg^{2+}	1,1	0,7	1,2	0,29
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	0,2	0,1	0,6	0,81
\sum_i \sum_1	12,7	6,7	21,2	0,35
Cond	30,4	23,4	44,1	0,23
Fe	817	485	2455	0,65
Mn	21	11	40	0,99
Al	380	150	665	0,58
Zn	2,2	1,3	6,7	0,84
Cu	1,6	0,8	5,6	0,77
pH	6,4	6,0	6,8	0,05
Chl	9,7	5,7	10,4	0,21
T	14,2	5,0	22,3	0,43

Примечание. *Общая взвесь (Susp, г/м³), цветность (Chr, градусы кобальтовой шкалы), общий фосфор ($P_{\text{общ}}$, мг/л), общий азот ($N_{\text{общ}}$, мг/л), общий органический углерод (TOC, мг С/л), содержание анионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , мг/л), катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, мг/л), сумма ионов (\sum_i , мг/л), удельная электропроводность (Cond, мкСм/см), содержание металлов (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, мкг/л) – данные лабораторных анализов; водородный показатель (pH), хлорофилл *a* (Chl, мкг/л) и температура (T, °C) определялись при помощи многопараметрического автоматического зонда.

Note. *Total suspension (Susp, g/m³), chroma (Chr, degrees of the cobalt scale), total phosphorus (P_{tot} , mg/l), total nitrogen (N_{tot} , mg/l), total carbon (TOC, mg C/l), the content of anion (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , mg/l), the content of cation (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, mg/l), total dissolved solids (\sum_1 , mg/l), specific electrical conductivity (Cond, mks/sm), the content of metals (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, mkg/l) – laboratory test data; hydrogen index (pH), chlorophyll *a* (Chl, µg/l), temperature (T, °C) were determined using a multi-parameter automatic zonde.

[Петрова, Гусева, 2015; Комулайнен и др., 2016]. Большинство озер водосборного бассейна характеризуются как мезогумусные и мезополигумусные, относятся к слабокислому нейтральному классу. Активная реакция среды от верховья к устью изменяется в щелочную сторону (от 5,50 до 6,65) [Рыжков, 1999; Куликова, 2012]. Максимальные значения pH наблюдались в летний период и свидетельствовали о росте потребления CO₂ в результате интенсификации процессов фотосинтеза. Минимальные значения соответствовали периодам поздней осени, когда процессы деструкции органического вещества преобладают. В сравнении с другими северными притоками Ладожского озера водородный показатель р. Уксунйоки был относительно низкий. Из-за повышенного содержания гуминовых веществ показатель цветности воды был высокий и в нижнем течении реки (табл. 1). Низкая минерализация и высокое содержание природных окрашенных органических соединений гумусовой природы характерны для большого числа водоемов Карелии [Куликова, 2013].

Сроки отбора проб указаны в таблице 2. Пробы зоопланктона отбирали с береговых камней

на однородном по течению по всей ширине реки участке, свободном от макрофитов, путем проливания 100 литров воды емкостью 5 л через сеть Апштейна (газ № 64) [Методические..., 1982]. Пробы фиксировали 40% раствором формалина до конечной концентрации 4 %. Обработку и определение проводили по стандартной методике [Определитель..., 2010].

Индивидуальная масса определялась по длине тела [Балушкина, Винберг, 1979]. Видовое разнообразие сообществ определялось по информационному индексу Шеннона – Уивера, который рассчитывали по численности (H_N, бит/экз.) и биомассе (H_B, бит/г) [Песенко, 1982]. Анализ качества воды осуществлялся на основе индекса сапробности (S) [Макрушин, 1974]. Доминирующими считали виды, численность которых составляла более 10 % от общей численности [Андроникова, 1996]. Биологическим летом считали период с июля по сентябрь, т. к. сдвиг сроков наступления биологических сезонов относительно календарных характерен для региона [Рыжков, 1999]. Физико-химические показатели и содержание хлорофилла в воде были получены при помощи многопараметри-

Таблица 2. Видовое богатство (n), численность (N, экз./м³), биомасса (B, г/м³) и доминирующие таксоны зоопланктона в нижнем течении р. Уксун

Table 2. Species richness (n), abundance (N, ind./m³), biomass (B, g/m³) and dominant zooplankton taxa in the downstream of the Uksun River

Дата Date	n	N	B	Доминирующие таксоны Dominant taxa
Весна Spring				
01.06.2011	1 (0)*	60	0,0003	<i>Cyclopidae</i> cop. 100**
10.06.2013	3 (0)	50	0,0016	<i>Acroperus harpae</i> (Baird, 1834) – 20, <i>Eurycercus (E.) lamellatus</i> (O.F. Müller, 1776) – 20, <i>E. serrulatus</i> – 20
20.05.2014	4 (1)	920	0,0031	<i>Cyclopidae</i> cop. – 43, <i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott, 1879) – 33, <i>Bosmina (Bosmina) longirostris</i> (O.F. Müller, 1785) – 11
01.06.2016	5 (1)	370	0,0021	<i>K. longispina</i> – 84
Лето Summer				
10.08.2011	18 (5)	380	0,0068	<i>B. (B.) longirostris</i> – 24, <i>Euchlanis lyra</i> Hudson, 1886 – 19, <i>Chydorus sphaericus</i> (O.F. Müller, 1785) – 10
19.07.2012	10 (1)	270	0,0057	<i>Disparalona rostrata</i> (Koch, 1841) – 21, <i>Bosmina (Eubosmina) cf. longispina</i> Baird, 1857 – 18, <i>Ch. sphaericus</i> – 10
19.09.2013	27 (2)	2740	0,0330	<i>Alonella nana</i> (Baird, 1850) – 13, <i>A. exigua</i> (Lilljeborg, 1901) – 10, <i>Chydorus gibbus</i> Sars, 1891 – 10
14.07.2014	6 (3)	110	0,0022	<i>K. longispina</i> – 18, <i>Synchaeta</i> sp. – 18, <i>A. nana</i> – 18
Осень Autumn				
25.10.2011	10 (4)	283	0,0110	<i>A. harpae</i> – 19, <i>E. (E.) lamellatus</i> – 19, <i>Ceriodaphnia quadrangular</i> (O.F. Müller, 1785) – 17
23.10.2012	4 (1)	40	0,0008	<i>A. harpae</i> – 25, <i>E. lyra</i> – 25, <i>Monospilus dispar</i> Sars, 1862 – 25
16.10.2014	1 (0)	10	0,0001	<i>A. harpae</i> – 100

Примечание. * Общее число таксонов, в скобках число таксонов коловраток, ** процент от общей численности зоопланктона.
Note. * Total number of taxa, the number of rotifers taxa is given in brackets, ** percentage of the total number of zooplankton.

ческого автоматического зонда YSI 6600D (YSI Incorporated, США) непосредственно во время отбора проб зоопланктона в поверхностном горизонте воды или оценены стандартными методами в лаборатории [Петрова, Гусева, 2015]. Были проанализированы зависимости обилия отдельных видов, основных групп (Rotifera, Cladocera, Copepoda) и общих показателей зоопланктона от 21 переменной (показателя) водной среды (табл. 1) и среднемесячного расхода воды ($W_{\text{п}}$, м³/с) [Основные..., 1978] за 11 сроков наблюдений (табл. 2). Для выявления связей между оцененными параметрами использовали корреляционный анализ (коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена), реализованный в пакете Statistica 6.0 (StatSoft Inc.).

Результаты и обсуждение

В 2011–2016 гг. в составе зоопланктона р. Уксунйоки было выявлено 42 вида и подвида зоопланктона из 53, известных для данного водотока [Куликова, 2012; Рябинкина и др., 2012; Алешина и др., 2014]. Отмеченные таксоны относились к 35 родам из 14 семейств (табл. 3), в том числе: 10 видов и подвидов группы Rotifera (25 %), 26 – Cladocera (63 %), 6 – Copepoda (12 %), из них 5 – представители Cyclopoida и 1 – Calanoida.

В ходе исследования 2011–2016 гг. в р. Уксунйоки впервые отмечены 26 видов и подвидов зоопланктеров. Среди них было 6 таксонов коловраток: *Conochilus unicornis* Rousset, 1892, *Euchlanis d. dilatata* Ehrenberg, 1832, *E. incise* Carlin, 1939, *E. lyra* Hudson, 1886, *Platyias quadricornis* (Ehrenberg, 1832), *Trichotria truncate* (Whitelegge, 1889); 16 – ветвистоусых: *Limnoscira frontosa* Sars, 1862, *Ceriodaphnia pulchella* Sars, 1862, *Acroperus angustatus* (Sars, 1863), *Alonopsis elongates* Sars, 1862, *Alona rectangular* Sars, 1862, *Graptoleberis testudina-*

ria (Fischer, 1851), *Monospilus dispar* Sars, 1862, *Alonella exigua* (Lilljeborg, 1901), *Chydorus gibbus* Sars, 1891, *Disparalona rostrata* (Koch, 1841), *Picripleuroxus laevis* (Sars, 1862), *Pleuroxus aduncus* (Jurine, 1820), *P. trigonellus* (O.F. Müller, 1785), *P. truncates* (O.F. Müller, 1785), *P. uncinatus* Baird, 1850, *Ilyocryptus agilis* Kurz, 1874; 4 вида веслоногих ракообразных: *Eucyclops macrurus* (Sars, 1863), *E. serrulatus* (Fischer, 1851), *Megacyclops viridis* (Jurine, 1820) и однократно в июне 2016 года встречен *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863.

Видовое богатство зоопланктона водотока в нижнем течении озерно-речной системы Уксунйоки было невысоким (табл. 2), так же как и в озерах верхнего течения реки [Куликова, 2012]. Наибольшее видовое богатство отмечено в конце лета 2011 г. и в начале осени 2013 г. (18 и 27 видов соответственно), а наименьшее – весной 2011 г. и осенью 2014 г. (по 1 таксону) (табл. 2). Низкое разнообразие таксонов наблюдалось весной и осенью (табл. 3). Наиболее часто в пробах встречались зоопланктеры: из группы коловраток *E. lyra*, из ракообразных *Acroperus harpae* (Baird, 1834), *Eurycercus (E.) lamellatus* (O.F. Müller, 1776), *Cyclopidae naup.*, *Chydorus sphaericus* (O.F. Müller, 1785). В среднем значения индекса видового разнообразия по численности ($H_N = 1,89$) и биомассе ($H_B = 1,42$) зоопланктона были невысокими, максимальные значения отмечены в летний период (табл. 4).

Анализ биогеографического распространения показал, что таксономический состав зоопланктона типичен для фауны Европейского Севера [Куликова, 2013]. Планктонное сообщество было представлено видами, имеющими всесветное (38 %), голарктическое (29 %), палеарктическое (29 %) и бореальное (4 %) географическое распространение. Таксономический состав был представлен эвритермными и

Таблица 3. Таксономическое разнообразие зоопланктона р. Уксунйоки

Table 3. Taxonomic diversity of zooplankton in the Uksunjoki River

Таксоны Taxa	Rotifera	Cladocera	Copepoda	Всего Total
Семейства Families	6* (6)**	6 (8)	3 (3)	14 (17)
Роды Genera	12 (10)	17 (20)	6 (7)	35 (37)
Виды и подвиды Species and subspecies	10 (16)	26 (31)	6 (6)	42 (53)

Примечание. *Число таксонов в период исследования 2011–2016 гг.; **без скобок указаны собственные данные, в скобках – общее число известных таксонов для данного водотока по собственным и литературным данным.

Note. *The number of taxa in the study period 2011–2016; **authors' data are given without brackets, the total number of the known taxa for the watercourse according to the authors' and published data – in brackets.

Таблица 4. Значимые ($p < 0,05$) коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена между факторами среды в реке Уксунйоки и показателями зоопланктонного сообщества – численностью (N, экз./м³), биомассой (B, мг/м³), числом видов (n), индексом Шеннона по численности (H_N) и по биомассе (H_B), индексом сапробности (S), численностью функциональных по питанию групп зоопланктона

Table 4. Significant ($p < 0.05$) Pearson and Spearman correlation coefficients between environmental factors in the Uksunjoki River and the indicators of the zooplankton community – abundance (N, ind./m³), biomass (B, mg/m³), the number of zooplankton species (n), Shannon index by abundance (H_N) and biomass (H_B), saprobity index (S), the number of functional feeding groups of zooplankton

Показатель развития зоопланктона Indicator of zooplankton development	Фактор среды (значение коэффициента корреляции Пирсона) Environmental factor (Pearson correlation coefficient value)	Фактор среды (значение коэффициента корреляции Спирмена) Environmental factor (Spearman correlation coefficient value)
N общая N general	Cl ⁻ (0,89)	Cond (0,68); P _{общ.} (-0,68); Ca ²⁺ (0,71); Cl ⁻ (0,79); SO ₄ ²⁻ (0,79); Mn (-0,71); Σ _n (0,89)
N Rotifera	SO ₄ ²⁻ (0,72); Fe (0,72); W _{fl} (0,61)	Cl ⁻ (0,75); SO ₄ ²⁻ (0,89); Σ _n (0,69)
N Cladocera	Cl ⁻ (0,87)	Cond (0,67); W _{fl} (-0,59)
N Соперода	Cl ⁻ (0,87)	Chr (-0,68); Ca ²⁺ (0,81); Mg ²⁺ (0,67); Mn (-0,68)
B общая B general	Cl ⁻ (0,84)	W _{fl} (-0,56)
B Rotifera	«	W _{fl} (-0,71)
B Cladocera	Cl ⁻ (0,83)	W _{fl} (-0,60)
B Соперода	Cl ⁻ (0,85)	Chr (-0,79); Cl ⁻ (0,79); Mn (-0,96); Σ _n (0,81)
n общее n general	Cl ⁻ (0,92); Σ _n (0,74)	Cl ⁻ (0,70); W _{fl} (-0,74)
n Rotifera	Ca ²⁺ (0,75); SO ₄ ²⁻ (0,67); Fe (0,78); Σ _n (0,63)	SO ₄ ²⁻ (0,70); W _{fl} (-0,65)
n Cladocera	Cl ⁻ (0,92); Σ _n (0,68)	W _{fl} (-0,65)
n Соперода	HCO ₃ ⁻ (0,74); Cl ⁻ (0,98); Σ _n (0,78)	HCO ₃ ⁻ (0,73); Ca ²⁺ (0,76); Cl ⁻ (0,80); Mn (-0,80); Σ _n (0,74)
H _N	W _{fl} (-0,55)	W _{fl} (-0,76)
H _B	HCO ₃ ⁻ (0,68); Cl ⁻ (0,89); Σ _n (0,71)	Cl ⁻ (0,75)
S	pH (0,70)	pH (0,71); SO ₄ ²⁻ (0,68); Σ _n (0,68)

Функциональные по питанию группы
Nutritionally functional groups

Организмы, добывающие пищу в толще воды Organisms that forage in the water column	Cl ⁻ (0,81); SO ₄ ²⁻ (0,67); Σ _n (0,70)	Cl ⁻ (0,81); SO ₄ ²⁻ (0,74); Σ _n (0,77)
Организмы, добывающие пищу с поверхности субстрата Organisms that forage from the surface of the substrate	Cl ⁻ (0,79)	W _{fl} (-0,60)
Прикрепленные к субстрату и плавающие в толще воды организмы Attached and floating in the water column organisms	HCO ₃ ⁻ (0,72); Cl ⁻ (0,98); Σ _n (0,76)	HCO ₃ ⁻ (0,73); Ca ²⁺ (0,76); Cl ⁻ (0,80); Mn (-0,80); Σ _n (0,74); W _{fl} (-0,67)
Смешанная группа ювенильных стадий циклопов A mixed group of juvenile stages of Cyclopoida	Cl ⁻ (0,85)	Ca ²⁺ (0,74); Mn (-0,79)

Примечание. Обозначение показателей среды (факторов) – как в таблице 1.

Note. For the designation of the environmental indicators (factors) see Table 1.

умеренно тепловодными видами, имеющими широкий ареал распространения в водоемах данного региона. Впервые отмечен стенотермный холодноводный ледниковый реликт морского происхождения – *L. macrurus*, характерный для крупных больших озер. Вероятно, эта находка связана с близостью места отбора проб к Ладожскому озеру, увеличивающей возможность переноса покоящихся яиц птицами.

На рис. 1 видно, что весной в 2011 и 2014 гг. по численности преобладали Copepoda, представленные науплиальными и копепоидными стадиями развития Cyclopoida, вероятно, выносимыми бурными потоками воды из вышележащих озер, заводей и затонов [Алешина и др., 2014]. Летом и осенью чаще всего по численности преобладали ракообразные группы Cladocera из семейства Chydoridae – *A. harpae*, *Ch. sphaericus*, представители рода *Alonella*, босмины – *Bosmina (Bosmina) longirostris* (O.F. Müller, 1785), *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina* Baird, 1857. Аналогично нашим результатам доминирование этих видов было зафиксировано в нижнем течении р. Уксун другими исследователями в 2013 г. [Комулайнен и др., 2016]. Основу биомассы составляли в основном Cladocera за счет крупных представителей – *E. (E.) lamellatus*, *L. frontosa*, *D. (D.) brachyurum*. Наибольшая численность коловраток закономерно отмечалась в весенний период. Поскольку руководящий комплекс был представлен мелкоразмерными *Kellicottia longispina* (Kellcott, 1879) и *E. lyra*, в соотношении планктона по биомассе коловратки имели меньшее значение. По литературным данным, в 1995 г. доминировала по численности (55 %) и по биомассе (53 %) группа Copepoda за счет массового развития *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863). Значительное место в биомассе занимали ветвистоусые рачки (до 41 %), среди которых превалировала *Daphnia (Daphnia) cristata* Sars, 1862 [Рыжков, 1999], в наших пробах планктона не отмеченная.

В р. Уксунйоки наблюдались одни из самых низких количественных показателей развития зоопланктона среди других 20 притоков Ладожского озера, которые были одновременно исследованы в весенний, летний и осенний сезоны [Kurashov et al., 2017]. За период исследования численность изменялась от 10 до 2,74 тыс. экз./м³, биомасса – от 0,0001 до 0,0330 г/м³ (табл. 2). Максимальное значение количественных показателей отмечено в сентябре 2013 г. (табл. 2). Эти показатели намного меньше, чем в аналогичных исследованиях в августе 2013 г., когда биомасса в верхнем течении составила 5,0 г/м³, а в нижнем – 1,6 г/м³ [Ко-

мулайнен и др., 2016]. В исследованиях 1995 г. также отмечено, что в количественном соотношении зоопланктон р. Уксунйоки беден [Рыжков, 1999]. Его численность на протяжении реки изменялась от 30 до 300 экз./м³ при биомассе 0,004–0,020 г/м³. Только в истоке реки за счет озерных форм величина численности зоопланктона достигала 85,1 тыс. экз./м³, биомасса – 0,439 г/м³ [Рыжков, 1999; Рябинкина и др., 2012]. Численность зоопланктона десяти исследованных озер в системе Уксунйоки в июле 1995 г. находилась в диапазоне 3,9–89,7 тыс. экз./м³, биомасса – 0,08–0,98 г/м³. Минимальные количественные показатели отмечены в небольшом оз. Сариярви, максимальные – в крупном

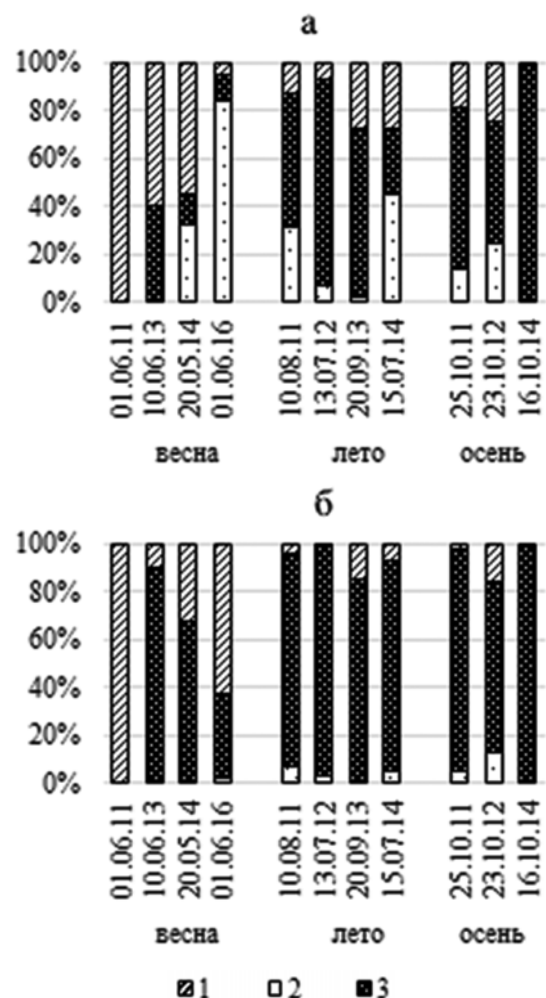


Рис. 1. Соотношение основных групп зоопланктона по численности (а) и по биомассе (б) в нижнем течении р. Уксунйоки в 2011–2016 гг.: 1 – Rotifera, 2 – Cladocera, 3 – Copepoda

Fig. 1. The ratio of the main groups of zooplankton by number (a) and biomass (б) in the downstream of the Uksunjoki River in 2011–2016: 1 – Rotifera, 2 – Cladocera, 3 – Copepoda

оз. Куйккаярви [Рябинкина и др., 2012]. Вероятно, снижение численности зоопланктона в нижнем течении происходит из-за губительного действия каменистых порогов и перекатов озерно-речной системы Уксунйоки. Высокая скорость водотока в сужениях приводит к гибели зоопланктеров, что подтверждается присутствием в пробах разрушенных остатков планктонных ракообразных. Зоопланктон реки был скудным, несмотря на наличие достаточно продуктивных озерных расширений на водотоке. В р. Кола к устью также снижаются количественные показатели, так как пропадают из видового состава относительно крупные виды ракообразных и коловраток, менее приспособленных к условиям высокой турбулентности речного потока [Круглова, 2009].

Большое влияние на количественные показатели и структуру зоопланктонного сообщества оказывают сезонные явления [Сярки, Фомина, 2015]. Наибольшее среднее за сезон видовое богатство (15 ± 5), численность (875 ± 624 экз./м³) и биомасса ($11,94 \pm 7,09$ мг/м³) в реке Уксунйоки отмечались в летний период (табл. 4), когда вода максимально прогревалась (до 22,3 °С). Наибольшего обилия достигала группа Cladocera за счет представителей семейства Chydoridae. В осенний период наблюдались наибольшие средние значения видового разнообразия и показателей биомассы, чем весной (табл. 4), несмотря на одинаково низкие температурные условия в эти сезоны. Среднее значение численности (350 ± 204 экз./м³) было большим, напротив, в весенний период, в связи с массовым развитием мелкоразмерных форм коловраток и науплий Copepoda.

Количественное развитие всего зоопланктона и его отдельных групп коррелирует с рядом оцененных характеристик водной среды (табл. 4). Наибольшее число значимых корреляций по коэффициенту Пирсона с показателями развития зоопланктона получено для хлорид-иона (14 корреляций), суммы ионов (7 корреляций), карбонат-ионов и сульфат-ионов (по 3 корреляции). Наибольшее число значимых корреляций по коэффициенту Спирмена получено для расхода воды (10 корреляций), хлорид-иона (8 корреляций) и суммы ионов (7 корреляций). В таблице 4 показано, что все характеристики сообщества планктонных ракообразных имеют высокую достоверную линейную связь с содержанием анионов Cl⁻, на развитие коловраток наибольшее влияние оказывают анионы SO₄²⁻. Коэффициент корреляции Спирмена показывает, что численность, биомасса и число видов представителей группы Copepoda зависят от концентрации Mn в воде. Количественное раз-

витие ракообразных Cladocera демонстрирует обратную зависимость от изменения гидрологических характеристик водотока в течение года (расход воды). От активной реакции водной среды (pH) зависит только индекс сапробности. Вопреки ожиданиям температура воды не оказалась среди наиболее значимых факторов для развития всего зоопланктона и групп в его составе. Таким образом, из факторов водной среды в р. Уксунйоки наиболее значимыми для развития зоопланктона, по-видимому, являются ионный состав воды и расход воды (табл. 4). В то же время, как показано в [Kurashov et al., 2017], формирование уровня количественного развития групп Copepoda, Rotifera и Cladocera в притоках Ладожского озера статистически связано прежде всего с такими интегральными физико-географическими факторами, как площадь водосбора, расход воды и озерность.

Ранее сравнительное описание гидробиоценозов карельских водоемов показало, что структура планктона в реках связана с гидрографическими особенностями их бассейнов [Рябинкина и др., 2012], наличием проточных озер, расстоянием от истока из проточных озер, заболоченностью водосборов [Комулайнен и др., 2016, 2017]. При исследовании фитопланктона притоков Ладожского озера также была выявлена зависимость количественного развития планктонного сообщества от озерности водосборного бассейна рек [Trifonova et al., 2007]. Зависимость структуры планктонных сообществ от интегральных показателей, а не от отдельных физико-химических параметров известна для разных типов водных экосистем. Исследование влияния факторов окружающей среды на зоопланктон равнинных рек центральной полосы России показало, что результат антропогенного и зоогенного влияния среды проявляется по-разному в зависимости от множества природных факторов, но особенно – гидрологических [Крылов, 2002]. В процессе формирования зоопланктона рек ведущую роль играют ландшафтно-климатические особенности водосбора рек (морфометрия русла, расход воды, температура) [Крылов, 2005]. Обилие потамопланктона в р. Висла (Польша) также определяли гидрологические условия [Napiórkowski, Napiórkowska, 2013]. Колебания уровня воды и характер течения были наиболее важными факторами, определяющими структуру и функционирование речных пойменных экосистем различных регионов [Junk et al., 1989; Neiff, 1990; Bozelli, 2015].

Наиболее часто в трофической структуре зоопланктонного сообщества нижнего течения р. Уксунйоки преобладали организмы, добывающие пищу с поверхности субстрата – ползаю-

щие-плавающие вторичные фильтраторы (Cladocera) (рис. 2), весной в 2014 и 2016 гг. преобладали организмы, отлавливающие пищу в толще воды – плавающие первичные фильтраторы (Rotifera). Подобное распределение сходно с трофической структурой быстротекущих участков малых рек Поволжья [Крылов, 2005].

Среднее значение индекса сапробности за период исследования составило 0,93 (табл. 5), максимальное значение 1,39 отмечено в сентябре 2013 года, что позволяет охарактеризовать воды озерно-речной системы Уксунйоки как чистые. Это соответствует гидрохимической оценке качества воды (II–III класс), рассчитанной по ИЗВ (Индексу загрязнения водоемов), равному 0,81–1,05 [Петрова, Гусева, 2015] и 0,5 [Комулайнен и др., 2016] в 2013 году. Оценка качества воды по фитопланктону также показала хорошее состояние водотока [Алешина, Афанасьева, 2014]. Исследования 1990–1997 гг., проводимые на проточных озерах и водотоке от истока до устья, характеризовали отдельные участки р. Уксунйоки как чистые и умеренно загрязненные (индекс сапробности 1,35–1,85) [Рыжков, 1999].

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать вывод, что зоопланктон нижнего течения р. Уксунйоки представлен типичными для водоемов данного региона видами. Сообщество включает 53 таксона, среди которых Rotifera – 16, Cladocera – 31, Copepoda – 6.

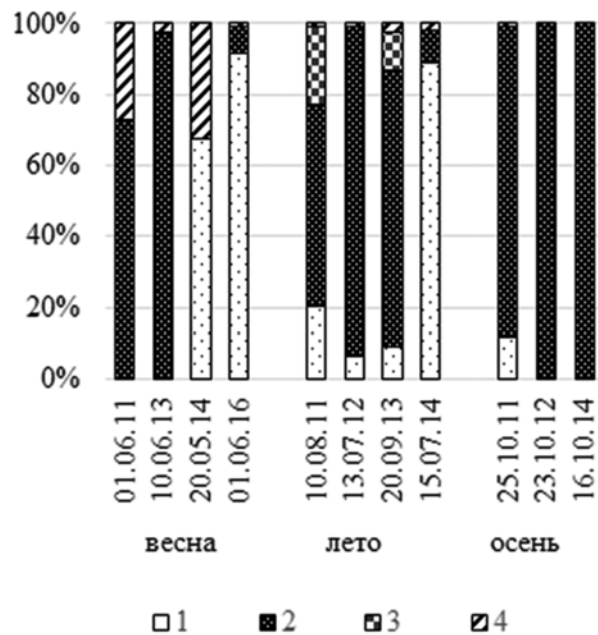


Рис. 2. Процентное соотношение групп в трофической структуре зоопланктона в нижнем течении р. Уксун в 2011–2016 гг.:

1 – организмы, добывающие пищу в толще воды, 2 – с поверхности субстрата, 3 – прикрепленные и плавающие в толще воды, 4 – смешанная группа ювенильных стадий циклопов

Fig. 2. The percentage of groups in the trophic structure of zooplankton in the downstream of the Uksun River in 2011–2016:

1 – organisms that forage in the water column, 2 – from the surface of the substrate, 3 – attached and floating in the water column organisms, 4 – a mixed group of juvenile stages of Cyclopoida

Таблица 5. Число видов зоопланктона общее (n), Rotifera (n_R), Cladocera (n_{Cl}), Copepoda (n_{Cop}), численность (N, экз./м³), биомасса (B, мг/м³), индекс Шеннона по численности (H_N) и по биомассе (H_B), индекс сапробности (S)

Table 5. The total number of zooplankton species (n), Rotifera (n_R), Cladocera (n_{Cl}), Copepoda (n_{Cop}), abundance (N, ind./m³), biomass (B, mg/m³), Shannon index by abundance (H_N) and biomass (H_B), saprobity index (S)

Сезон Season	Весна Spring	Лето Summer	Осень Autumn
Показатель Indicator			
n	3 ± 1*	15 ± 5	5 ± 3
n_R	1 ± 0	3 ± 1	2 ± 1
n_{Cl}	2 ± 1	11 ± 4	3 ± 1
n_{Cop}	1 ± 0	2 ± 1	1 ± 0
N	350 ± 204	875 ± 624	111 ± 87
B	1,77 ± 0,59	11,94 ± 7,09	3,93 ± 3,54
H_N	1,17 ± 0,19	2,42 ± 0,23	1,11 ± 0,61
H_B	0,98 ± 0,10	1,98 ± 0,51	0,69 ± 0,35
S	1,00 ± 0,35	1,14 ± 0,13	0,68 ± 0,12

Примечание. *Среднее арифметическое ± стандартная ошибка среднего.

Note. *Arithmetical mean ± standard error of mean.

Зоопланктон нижнего течения озерно-речной системы Уксунйоки имеет низкое количественное развитие. Наибольшее значение в летний период в структуре зоопланктона по численности и биомассе имели ракообразные группы Cladocera из семейства Chydoridae. Среди оцененных факторов водной среды в р. Уксунйоки наиболее значимыми для развития зоопланктона, по-видимому, являются ионный состав воды и расход воды. Воды р. Уксунйоки по показателям сообщества зоопланктона можно охарактеризовать как условно чистые, пригодные для всех видов водопользования. Оценка качества воды совпадала с данными предыдущих лет исследований из литературных источников. Несмотря на то что антропогенное влияние человека пока не привело к существенным изменениям в озерно-речной системе Уксунйоки, необходимо дальнейшее исследование зоопланктона с целью мониторинга и охраны притоков Ладожского озера.

Литература

- Алешина Д. Г., Курашов Е. А., Родионова Н. В., Гусева М. А. Современное состояние весеннего зоопланктона притоков Ладожского озера // *Вода: химия и экология*. 2014. № 4. С. 64–71.
- Алешина Д. Г., Афанасьева А. Л. Оценка экологического состояния малых рек – притоков Ладожского озера // *Экосистемы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана: Мат-лы II Всерос. школы-конференции, 18–22 ноября 2014 г. Т. II*. Ярославль: Филигрань, 2014. С. 13–16.
- Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем. СПб.: Наука, 1996. 189 с.
- Антонов Е. А. Ландшафты и гидрология лососевых рек Ладожского озера. Справочное пособие. СПб.: Комплекс, 2003. 316 с.
- Балушкина Е. В., Винберг Г. Г. Зависимость между массой и длиной тела у планктонных животных // *Общие основы изучения водных экосистем*. Л.: Наука, 1979. С. 169–172.
- Каталог озер и рек Карелии* / Ред. Н. Н. Филатов, А. В. Литвиненко. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2001. 286 с.
- Комулайнен С. Ф., Лозовик П. А., Круглова А. Н., Барышев И. А., Галибина Н. А. Оценка экологического состояния рек северного побережья Ладожского озера по химическим показателям и структуре гидробиоценозов // *Водные ресурсы*. 2016. Т. 43, № 3. С. 277–286. doi: 10.7868/S0321059616030093
- Комулайнен С. Ф., Лозовик П. А., Круглова А. Н., Барышев И. А., Сластина Ю. Л., Галибина Н. А. Современное состояние реки Сюскюяййоки (бассейн Ладожского озера, Республика Карелия) // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2017. № 7. С. 19–33. doi: 10.17076/bg597
- Круглова А. Н. Зоопланктон реки Колы (бассейн Баренцева моря) // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2009. № 4. С. 85–89.
- Крылов А. В. Зоопланктон равнинных малых рек. М., 2005. 263 с.
- Крылов А. В. Изменение структурной организации зоопланктона малой реки в условиях различной проточности // *Биология внутренних вод*. 2002. № 2. С. 51–54.
- Куликова Т. П. Зоопланктон водных объектов северной части бассейна Ладожского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 192 с.
- Куликова Т. П. Изученность зоопланктона водных объектов Республики Карелия // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2013. № 6. С. 63–75.
- Лозовик П. А., Галахина Н. Е., Кравченко И. Ю. Современное состояние водных объектов Карелии в результате воздействия природных, климатических и антропогенных факторов // *Водное хозяйство России*. 2017. № 3. С. 24–39.
- Макрушин А. В. Биологический анализ качества вод. Л.: ЗИН АН СССР, 1974. 60 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция*. Л., 1982. 33 с.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России*. Т. 1: Зоопланктон. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 495 с.
- Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики (за 1971–1975 гг. и весь период наблюдений)*. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 670 с.
- Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
- Петрова Т. Н., Гусева М. А. Гидрохимический режим и оценка качества воды притоков Ладожского озера // *Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года»*. 2015. Т. 1. С. 457–464.
- Расплетина Г. Ф., Кулиш Т. П., Петрова Т. Н. Гидрохимическая характеристика рек – притоков Ладожского озера и р. Невы // *Оценка экологического состояния рек бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям и структуре гидробиоценозов*. СПб.: Лема, 2006. С. 11–35.
- Рыжков Л. П. Озера бассейна Северной Ладоги. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. 201 с.
- Рябинкина М. Г., Куликова Т. П., Рыжков Л. П. Зоопланктон водоемов бассейна Северной Ладоги // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2012. № 1. С. 113–125.
- Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2015. № 1. С. 63–68. doi: 10.17076/eco37
- Bozelli R. L., Thomaz S. M., Padial A. A., Lopes P. M., Bini L. M. Floods decrease zooplankton beta diversity and environmental heterogeneity in an Amazonian floodplain system // *Hydrobiologia*. 2015. No. 753. P. 233–241.
- Junk W. J., Bayley P. B., Sparks R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems // *Canadian Special*

Publication of Fisheries and Aquatic Sciences. 1989. No. 106. P. 110–127.

Kurashov E. A., Aleshina D. G., Guseva M. A., Petrova T. N., Krylova J. V. The role of environmental factors in the formation of zooplankton in tributaries of Lake Ladoga (Russia) // *Appl. Ecol. Environ. Res.* 2017. No. 15(4). P. 1511–1540.

Napiórkowski P., Napiórkowska T. The diversity and longitudinal changes of zooplankton in the lower course of a large, regulated European river (the lower Vistula River, Poland) // *Biologia.* 2013. Vol. 68, iss. 6. P. 1163–1171.

Neiff J. J. Ideas para la interpretación ecológica del Paraná // *Interciencia.* 1990. No. 15. P. 424–441.

Trifonova I., Pavlova O., Rusanov A. Phytoplankton as an indicator of water quality in the rivers of the Lake Ladoga basin and its relation to environmental factors // *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 2007. Bd. 167, no. 3-4. P. 527–549.

References

Aleshina D. G., Kurashov E. A., Rodionova N. V., Guseva M. A. The current state of the spring zooplankton in the tributaries of Lake Ladoga. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: Chemistry and Ecology.* 2014;4: 64–71. (In Russ.)

Aleshina D. G., Afanas'eva A. L. Assessment of the ecological state of the small rivers – tributaries of Lake Ladoga. *Ekosystemy malykh rek: bioraznobraziye, ekologiya, okhrana: Materialy II Vseros. shk.-konf. (Yaroslavl', 18–22 noyabrya 2014 g.) = Ecosystems of small rivers: Biodiversity, ecology, and conservation: Proceed. of the II All-Russian school-conference (Yaroslavl, Nov. 18–22, 2014).* Vol. II. Yaroslavl: Filigran; 2014. P. 13–16. (In Russ.)

An identification guide to zooplankton and zoobenthos in the fresh waters of European Russia. Vol. 1: Zooplankton. Moscow: KMK; 2010. 495 p. (In Russ.)

Andronikova I. N. Structural and functional organization of zooplankton in lake ecosystems. St. Petersburg: Nauka; 1996. 189 p. (In Russ.)

Antonov E. A. Landscapes and hydrology of salmon rivers of Lake Ladoga. A reference book. St. Petersburg: Komplex; 2003. 316 p. (In Russ.)

Balushkina E. V., Vinberg G. G. The relationship between weight and body length in planktonic animals. *Obshchie osnovy izucheniya vodnykh ekosistem = General framework for studying aquatic ecosystems.* Leningrad: Nauka; 1979. P. 169–172. (In Russ.)

Bozelli R. L., Thomaz S. M., Padial A. A., Lopes P. M., Bini L. M. Floods decrease zooplankton beta diversity and environmental heterogeneity in an Amazonian floodplain system. *Hydrobiologia.* 2015;753:233–241.

Filatov N. N., Litvinenko A. V. (eds.). A catalogue of lakes and rivers in Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. 286 p. (In Russ.)

Junk W. J., Bayley P. B., Sparks R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences.* 1989;106:110–127.

Komulainen S. F., Lozovik P. A., Kruglova A. N., Baryshev I. A., Galibina N. A. Assessment of the

ecological state of the rivers on the northern coast of Lake Ladoga by chemical parameters and the structure of hydrobiocenoses. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2016;43(3):277–286. doi: 10.7868/S0321059616030093 (In Russ.)

Komulainen S. F., Lozovik P. A., Kruglova A. N., Baryshev I. A., Slastina U. L., Galibina N. A. Current state of the Syuskyuyanjoki River (Lake Ladoga basin, Republic of Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2017;7:19–33. doi: 10.17076/bg597 (In Russ.)

Kruglova A. N. Zooplankton of the Kola River (Barents Sea basin). *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2009;4:85–89. (In Russ.)

Krylov A. V. Zooplankton of small plain rivers. Moscow: Nauka; 2005. 263 p. (In Russ.)

Krylov A. V. Changes in the structural organization of zooplankton in a small river under conditions of different flow rates. *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology.* 2002;2:51–54. (In Russ.)

Kulikova T. P. Zooplankton of water bodies in the northern part of the Lake Ladoga basin. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 192 p. (In Russ.)

Kulikova T. P. Study of zooplankton in water bodies of the Republic of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2013;6:63–75. (In Russ.)

Kurashov E. A., Aleshina D. G., Guseva M. A., Petrova T. N., Krylova J. V. The role of environmental factors in the formation of zooplankton in tributaries of Lake Ladoga (Russia). *Appl. Ecol. Environ. Res.* 2017;5(4):1511–1540.

Lozovik P. A., Galakhina N. E., Kravchenko I. U. The current state of the water bodies of Karelia as a result of the impact of natural, climatic, and anthropogenic factors. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Economy of Russia.* 2017;3:24–39. (In Russ.)

Makrushin A. V. Biological analysis of water quality. Leningrad: ZIN AS USSR; 1974. 60 p. (In Russ.)

Methodological recommendations for collecting and processing materials during hydrobiological studies in freshwater reservoirs. Zooplankton and its products. Leningrad: GosNIORKh, ZIN AN SSSR; 1982. 33 p. (In Russ.)

Napiórkowski P., Napiórkowska T. The diversity and longitudinal changes of zooplankton in the lower course of a large, regulated European river (the lower Vistula River, Poland). *Biologia.* 2013;68(6):1163–1171.

Neiff J. J. Ideas para la interpretación ecológica del Paraná. *Interciencia.* 1990;15:424–441.

Pesenko U. A. Principles and methods of quantitative analysis in faunistic research. Moscow: Nauka; 1982. 288 p. (In Russ.)

Petrova T. N., Guseva M. A. Hydrochemical regime and water quality assessment of the tributaries of Lake Ladoga. *Nauchnoe obespechenie realizatsii "Vodnoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 g" = Scientific support for the implementation of the 'Water Strategy of the Russian Federation for the Period until 2020'.* 2015;1:457–464. (In Russ.)

Raspletina G. F., Kulish T. P., Petrova T. N. Hydrochemical description of the rivers – tributaries of Lake Ladoga and the Neva River. *Otsenka*

ekologicheskogo sostoyaniya rek basseina Ladojskogo ozera po gidrokhimicheskim pokazatelyam i structure gidrobiotsenozov = Assessment of the ecological state of rivers in the Lake Ladoga basin by hydrochemical indicators and the structure of hydrobiocenoses. St. Petersburg: Lema; 2006. P. 11–35. (In Russ.)

Ryabinkina M. G., Kulikova T. P., Ryjkov L. P. Zooplankton of reservoirs of the Northern Ladoga basin. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2012;1:113–125. (In Russ.)

Ryzhkov L. P. Lakes in the basin of northern Ladoga. Petrozavodsk: PetrSU; 1999. 201 p. (In Russ.)

State water cadastre. Main hydrological characteristics (for 1971–1975 and the entire observation period). Vol. 2. Karelia and the North-West. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1978. 670 p. (In Russ.)

Syarki M. T., Fomina U. U. Seasonal changes in zooplankton of the Petrozavodsk Bay of Lake Onego. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2015(1):63–68. doi: 10.17076/eco37 (In Russ.)

Trifonova I., Pavlova O., Rusanov A. Phytoplankton as an indicator of water quality in the rivers of the Lake Ladoga basin and its relation to environmental factors. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 2007;167(3-4):527–549.

Поступила в редакцию / received: 12.05.2022; принята к публикации / accepted: 25.08.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Алешина Дина Гильмитдиновна

младший научный сотрудник лаборатории водных биоресурсов

e-mail: dinaaleshina_21@gmail.com

Курашов Евгений Александрович

д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией гидробиологии

e-mail: evgeny_kurashov@mail.ru

Гусева Мария Андреевна

научный сотрудник лаборатории гидрохимии

e-mail: velapandere@gmail.com

Петрова Татьяна Николаевна

младший научный сотрудник лаборатории гидрохимии

e-mail: tatianik@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Aleshina, Dina

Junior Researcher

Kurashov, Evgeny

Dr. Sci (Biol.), Professor, Head of Laboratory

Guseva, Maria

Researcher

Petrova, Tatyana

Junior Researcher

УДК 582.26

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМЕРНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИНАМИКИ БИОМАССЫ ПЛАНКТОННЫХ СИНЕ-ЗЕЛЕННЫХ, ДИАТОМОВЫХ И ЗЕЛЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЧУДСКО-ПСКОВСКОГО ОЗЕРА

С. Г. Михалап^{1*}, Е. М. Воробьева¹, Д. Н. Судницына¹, В. В. Борисов²

¹ Псковский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии («ПсковНИРО») (ул. Максима Горького, 13, Псков, Россия, 180007), *bibpskniorh@gmail.com

² Псковский государственный университет (пл. Ленина, 2, Псков, Россия, 180000)

В представленной работе на примере трех таксономических групп микроводорослей Псковского озера (сине-зеленых, зеленых и диатомовых) рассматривается влияние комплексных гидролого-гидрохимических условий среды на многолетнюю динамику биомассы. Кластерный анализ, выполненный на основе данных по многолетней динамике биомассы фитопланктона в Псковском озере, показал, что сине-зеленые водоросли отличаются наибольшим своеобразием, в то время как диатомовые и зеленые водоросли имеют значительное сходство. Приводится обоснование применения метода главных компонент как процедуры, позволяющей выполнить редукцию данных и создать независимые компоненты, при помощи которых значительно легче описать происходящие в системе закономерности. Перед проведением процедуры анализа производится проверка на мультиколлинеарность данных при помощи корреляционного анализа. В ходе анализа выявлено пять главных компонент, определяющих закономерности изменения биомассы фитопланктона. Показано, что сине-зеленые водоросли имеют наибольшую зависимость от температурного режима озера и содержания в воде растворенных минеральных и органических соединений, что вполне согласуется с данными, полученными другими авторами. Зеленые водоросли, по сравнению с сине-зелеными, более чувствительны к кислотно-щелочному балансу водной среды, а для комплекса диатомовых водорослей существенное значение имеет лишь уровенный режим и продолжительность подледного периода.

Ключевые слова: Чудско-Псковское озеро; фитопланктон; факторный анализ; биомасса

Для цитирования: Михалап С. Г., Воробьева Е. М., Судницына Д. Н., Борисов В. В. Использование многомерных методов анализа при изучении динамики биомассы планктонных сине-зеленых, диатомовых и зеленых водорослей в южной части Чудско-Псковского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 133–141. doi: 10.17076/lim1626

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант № 20-64-46018.

**S. G. Mikhalap^{1*}, E. M. Vorob'eva¹, D. N. Sudnitsyna¹, V. V. Borisov².
APPLICATION OF MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS METHODS IN STUDYING
THE DYNAMICS OF PLANKTONIC CYANOBACTERIA, DIATOMS AND
CHLOROPHYTA BIOMASS IN THE SOUTHERN PART OF LAKE PEIPUS**

¹ Pskov Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (PskovNIRO) (13 Maksima Gor'kogo St., 180007 Pskov, Russia), *bibpskniorh@gmail.com

² Pskov State University (2 Lenin Sq., 180000 Pskov, Russia)

The influence of hydrological and hydrochemical conditions on the long-term biomass dynamics is studied using three taxonomic groups of microalgae in Lake Peipus (Cyanobacteria, Chlorophyta and Diatoma). Cluster analysis based on long-term phytoplankton biomass dynamics in the lake showed that blue-green algae stood apart, while diatoms and green algae were quite similar to each other. The rationale for the application of principal components analysis is that this procedure allows reducing the data set and creating independent components, making it much easier to describe patterns in the systems. Before the analysis, data were checked for multicollinearity using correlation analysis. Analysis revealed five principal components which determined the patterns of change in phytoplankton biomass. It is shown that Cyanobacteria depend the most on the lake temperature regime and the content of dissolved mineral and organic compounds in the water, which is in full agreement with the data reported by other authors. Chlorophyta, compared with blue-green algae, are more sensitive to the acid-base balance of the water. As for diatoms, only the water level and the duration of the ice-covered period matter.

Keywords: Lake Peipus; phytoplankton; factor analysis; biomass

For citation: Mikhalap S. G., Vorobieva E. M., Sudnitsyna D. N., Borisov V. V. Application of multidimensional analysis methods in studying the dynamics of planktonic cyanobacteria, diatoms and chlorophyta biomass in the southern part of Lake Peipus. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 133–141. doi: 10.17076/lim1626

Funding. The study was funded by Russian Science Foundation grant # 20-64-46018.

Введение

Чудско-Псковское озеро, один из крупнейших водоемов Европы, включает в себя три части: северную – Чудское озеро площадью 2611 км³, южную – Псковское озеро площадью 708 км³ и соединяющий их пролив – Теплое озеро (236 км³). Этот мелководный эвтрофный водоем, имеющий трансграничный статус, относится к хорошо изученным как в России, так и в Эстонии. Результаты его исследований, продолжающихся с середины XIX века, подробно излагались в монографиях и многочисленных статьях. Последняя коллективная монография «Peipsi», подготовленная совместно эстонскими и российскими специалистами, издана в 2008 г. (перевод на русский язык с дополнениями – в 2012 г.). История изучения состояния водоема по показателям фитопланктона за период с 1970 по 2010 гг. подробно охарактеризована в монографии В. В. Ястремского [2016].

Чудско-Псковское озеро относится к планктонному типу, где первичная продукция фитопланктона превышает продукцию других вод-

ных растительных сообществ, а именно макрофитов, фитоперифитона и фитобентоса [Лаугасте и др., 2012]. В составе сообщества планктонных микроводорослей водоема выявлено более 1000 видов, из них в пелагической части – около 500. В пелагиали южной части озера отмечено 374 вида [Ястремский, 2016].

Основу фитопланктона Псковского озера, как и всего озера, составляют 3 таксона: диатомовые, сине-зеленые и зеленые водоросли. Водоросли других отделов (динофитовые, криптофитовые, эвгленовые и желто-зеленые) играют незначительную роль в фитопланктоне, но в отдельные годы и сезоны некоторые из них, особенно крупноклеточные формы из динофитовых и эвгленовых, вносят значительный вклад в общую продукцию.

Основные проблемы Чудско-Псковского озера по-прежнему связаны с антропогенным эвтрофированием, несмотря на то, что поступление питательных веществ после 90-х годов прошлого столетия несколько сократилось. В последнее время в водоеме

главными источниками поступления биогенов, в первую очередь фосфора, стали донные отложения [Игнатьева, 2012; Tammeorg et al., 2020], поэтому для водоема характерно некоторое превышение биогенной нагрузки (фосфорной в 1,15 раза, азотной в 2 раза) [Лозовик, Фруммин, 2018]. В южной части озера – в Псковском озере, которое почти полностью располагается на территории России, содержание биогенов выше, чем в Чудском. По данным О. Tammeorg [2020], за период 2003–2016 гг. среднемноголетнее содержание биогенных веществ в поверхностном слое Псковского озера составило: 0,77 мг/дм³ общего азота и 0,086 мг/дм³ общего фосфора.

В последние годы в связи с глобальными климатическими изменениями, сопровождающимися повышением теплообеспеченности водных масс, в сезонной динамике ряда лимнологических процессов на Чудско-Псковском водоеме стали проявляться определенные отклонения, например, температурные аномалии, изменение сроков ледостава и т. п., влияющие на продолжительность и экологические особенности биологических сезонов. Как справедливо отмечает В. В. Ястремский [2016], при высокой обеспеченности биогенными элементами основными факторами, влияющими на уровень развития гидробионтов, становятся климатические. Это усугубляется тем, что водосбор Чудско-Псковского озера располагается в зоне переходного климата от морского к континентальному [Слинчак, 2012]. Нельзя также не отметить и значительное косвенное воздействие климатических факторов, которое заключается во влиянии на гидрологические и гидрохимические процессы в водоемах, в том числе и на круговороты биогенных элементов [Pant, 2007; Breton et al., 2020 и др.].

Многолетними исследованиями установлено, что из климатических факторов, определяющих сезонные и межгодовые различия в развитии фитопланктона Чудско-Псковского озера, выделяются колебания уровня и температуры воды. Влияние уровня воды на последующее состояние фитопланктона довольно хорошо изучено. По данным В. В. Ястремского [1983], в Псковском озере в многоводную фазу происходит снижение биомассы фитопланктона. Особенно отчетливо отрицательное влияние этого фактора проявляется в отношении сине-зеленых и зеленых водорослей.

Что касается температурного фактора, то по результатам многолетних исследований установлено его положительное влияние на рост и развитие сине-зеленых водорослей Псковского озера.

В настоящей работе авторами предпринята попытка проследить, как климатические факторы и связанные с ними параметры среды влияют на многолетнюю динамику развития трех основных таксонов фитопланктона в южной части Чудско-Псковского водоема – Псковском озере – в период с 1980 по 2021 гг.

Материалы и методы

Изучение Чудско-Псковского озера проводится регулярно на постоянных станциях. В российской части акватории гидрохимические и гидробиологические пробы отбирались ежемесячно с мая по октябрь на 5 станциях в Чудском озере и 4 станциях в Псковском.

Непосредственно на станциях лимнологических наблюдений осуществлялось измерение глубины, температуры воды, ее прозрачности, цветности, величины рН, а также фиксация проб кислорода. Последующие анализы проб воды проводились по общепринятым методикам лимнологических исследований [Алекин, 1973; Унифицированные..., 1977].

Учитывая высокую гидродинамическую активность водной толщи Чудско-Псковского озера, вследствие его мелководности и большой акватории, отбор проб воды батометром Рутнера производился обычно с поверхностного горизонта, и лишь во время максимального прогрева воды (июль-август) осуществлялся дополнительный отбор проб с придонного горизонта в центральных частях Чудского и Псковского озер. Всего в дальнейшем анализе использовалось 12 гидрологических и гидрохимических параметров среды.

Отбор проб фитопланктона осуществляли с поверхности воды в пробоотборники объемом 0,5 л и фиксировали 40%-м раствором формалина. После концентрации осадочным методом пробы просчитывали в камере Нажотта объемом 0,01 мл. Биомассу определяли общепринятым счетно-объемным методом.

Выявление взаимосвязи фитопланктонных организмов со средовыми характеристиками и степени тесноты этих связей выполнялось с применением методов корреляционного и регрессионного анализов. Поскольку большая часть из использованных в анализе переменных среды не подчиняется закону нормального распределения, для расчета степени связи между ними был использован ранговый коэффициент корреляции Спирмена, который позволяет рассчитывать силу связей между переменными вне зависимости от типа распределения [Пузаченко, 2004].

Для выявления степени сходства многолетней динамики биомассы основных рассматриваемых групп водорослей был выполнен иерархический кластерный анализ.

С целью выявления комплексных зависимостей между характеристиками среды и показателями биомассы фитопланктона, а также для сокращения числа рассматриваемых переменных был выполнен факторный анализ, а именно метод главных компонент, главной задачей которого является отображение исходной системы переменных среды во вновь получаемых ортогональных (независимых) координатах. Благодаря этой процедуре нам удалось сократить количество переменных, используемых в анализе, без существенной потери данных [Пузаченко, 2004].

Главные компоненты не коррелируют между собой, т. е. целью метода главных компонент является отображение исходной системы в ортогональных координатах и выявление строго независимых направлений изменчивости переменных. В отличие от МГК в факторном анализе выполняется поворот осей главных компонент с целью максимизировать наибольшие нагрузки и обнулить незначительные (так называемые итеративные методы), в результате чего факторы могут коррелировать друг с другом. Данная процедура проводится для наибольшей контрастности групп зависимых переменных. В этом случае факторный анализ позволяет выявить более естественные группы переменных среды, но главным недостатком является то, что они зачастую связаны между собой (коллинеарны) [Пузаченко, 2004; Коросов и др., 2007].

При определении количества главных компонент (факторов), достаточных для описания существующей системы взаимосвязей между тремя группами микроводорослей и характеристиками среды, использован критерий Кайзера [Braeken, van Assen, 2017], согласно которому для дальнейшего анализа используются только те главные компоненты, собственные значения которых больше 1, т. е. если они выделяют дисперсию, эквивалентную по крайней мере дисперсии одной переменной. Главные компоненты, не отвечающие этим требованиям, опускаются. В нашем случае для дальнейшего анализа были выбраны 5 главных компонент, и все последующие процедуры выполнялись именно с ними. Также следует отметить, что другой критерий оценки количества главных компонент, достаточных для описания системы, – критерий «каменистой осыпи» – дал тождественные результаты.

Все этапы обработки и визуализации данных производились при помощи программ MO Excel и программы обработки данных Statistica 13.

Результаты и обсуждение

Предварительный анализ структуры данных, использованных в анализе, показал, что большая часть из них не подчиняется закону нормального распределения, что не позволяет корректно применять ряд параметрических статистических критериев, в частности корреляцию Пирсона [Пузаченко, 2004]. Произведенный расчет коэффициентов корреляции Спирмена между переменными показал высокую зависимость между цветностью и перманганатной окисляемостью ($R = 0,71$; $p < 0,05$), поэтому было принято решение об исключении характеристики цветности из дальнейшей процедуры для устранения эффекта мультиколлинеарности.

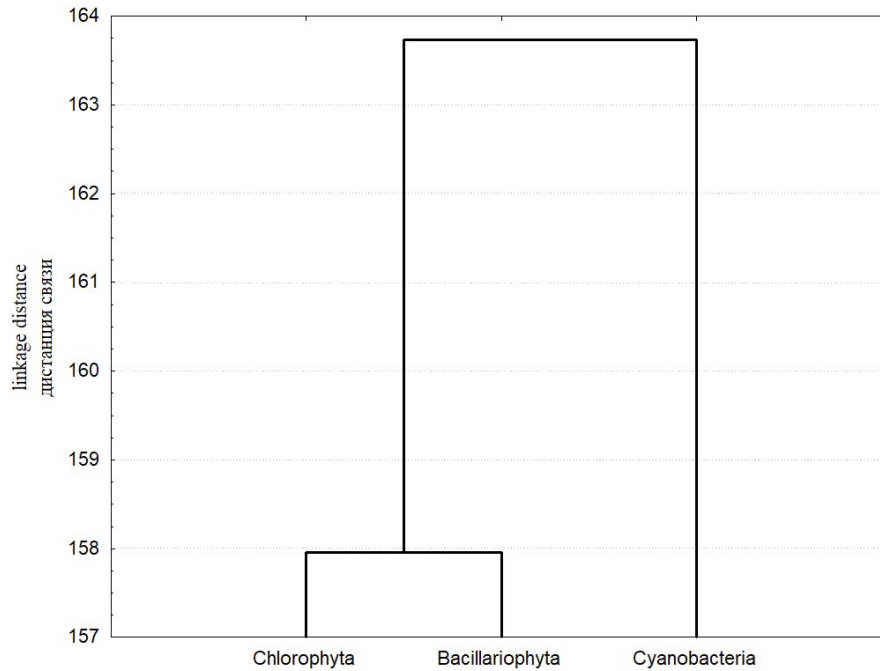
По особенностям многолетней динамики биомассы в Псковском озере сине-зеленые водоросли отличаются наибольшим своеобразием, в то время как диатомовые и зеленые водоросли имеют значительное сходство в динамике биомассы (рис.). Скорее всего, данное обстоятельство обусловлено более сильной зависимостью цианобактерий от средовых флуктуаций, в частности от температурного режима и концентрации растворенных веществ.

Выявление комплексной взаимосвязи фитопланктона со средовыми характеристиками и степени тесноты этих связей выполнялось с применением методов корреляционного анализа, являющегося своего рода «разведочным» методом, позволяющим определить направление и силу связей между переменными среды и биомассой основных групп микроводорослей, и регрессионного анализа, который позволяет установить вид зависимости признака от нескольких других признаков и помогает ответить на вопрос, какая из характеристик среды является наиболее значимой для развития групп фитопланктона.

Кроме того, с целью контрастирования взаимосвязей между характеристиками среды и показателями биомассы фитопланктона и редукции данных был применен метод главных компонент (МГК). После проведения анализа МГК определялся физический смысл выделенных главных компонент. Для этой цели были рассчитаны коэффициенты корреляции между вновь созданными главными компонентами и использованными для их получения переменными среды (табл. 1). В таблице 1 представле-

ны значения коэффициентов корреляции между значениями переменных среды и собственными значениями вновь выделенных главных компонент. При анализе данной таблицы важна в первую очередь сила связи, а также ее направление, поскольку экологическая интерпре-

тация главных компонент возможна только при понимании характера размещения переменных среды во вновь созданном редуцированном пространстве, «осями» которого как раз и выступают полученные главные компоненты [Пущаченко, 2004].



Дендрограмма сходства многолетней динамики биомасс основных таксонов фитопланктона в Псковском озере

Similarity dendrogram of long-term biomass dynamics of the main phytoplankton taxa in Lake Pskovskoye

Таблица 1. Значения факторных нагрузок выделенных главных компонент (ГК)

Table 1. Values of factor loadings of the selected principal components (PC)

Переменные среды Environment variables	ГК 1 PC 1	ГК 2 PC 1	ГК 3 PC 1	ГК 4 PC 1	ГК 5 PC 1
Температура / Temperature	-0,37	-0,71	-0,26	0,04	-0,14
Уровень воды / Water level	-0,09	0,01	-0,32	-0,78	-0,10
Прозрачность / Transparency	-0,22	-0,40	-0,36	-0,09	0,57
Растворенный кислород Dissolved oxygen	-0,18	-0,58	0,50	0,15	0,16
pH	0,05	0,23	0,81	-0,19	0,16
Фотосинтез / Photosynthesis	-0,84	0,37	0,08	0,06	0,05
Деструкция / Destruction	-0,23	-0,63	0,18	0,03	-0,46
Сумма ионов / Sum of ions	-0,88	0,26	-0,10	0,02	-0,00
Перманганатная окисляемость Permanganate oxidizability	-0,85	0,33	-0,02	-0,07	0,09
БПК ₅ / Biochemical oxygen demand (BOD)	-0,45	-0,59	0,29	-0,17	-0,01
Продолжительность подледного периода (дней) Ice period duration (days)	0,38	-0,08	0,21	-0,62	0,11

Примечание. Жирным шрифтом выделены наиболее значимые коэффициенты корреляции.

Note. The most significant correlation coefficients are given in bold.

Таблица 2. Физический смысл полученных главных компонент и их вклад в описание дисперсии рассматриваемых переменных

Table 2. Physical meaning of the obtained principal components and their contribution to the description of the variables variance

Фактор (ГК) Factor (PC)	Описание Description	% описания % of variance description
ГК 1 PC 1	Содержание в воде минеральных веществ, в том числе и окисляемых автохтонных Content of mineral substances in water, including oxidizable autochthonous ones	27,6
ГК 2 PC 2	Термический режим, содержание органических веществ и биогенов в воде Thermal regime, content of organic substances and nutrients in water	17,7
ГК 3 PC 3	Содержание в воде растворенного кислорода и повышение щелочности среды Content of dissolved oxygen in water and alkalinity of the environment	13,4
ГК 4 PC 4	Уровенный режим и продолжительность ледостава Water level regime and ice-period duration	9,6
ГК 5 PC 5	Прозрачность воды Water transparency	6,7

Следует обратить внимание на то, что по мере снижения порядкового номера главной компоненты ее корреляции с переменными снижаются и становятся все более специфичными. Это закономерный процесс процедуры получения главных компонент, т. к. они выделяются последовательно и содержат все меньше и меньше общей дисперсии. В совокупности все выделенные главные компоненты описывают 75,8 % происходящих в системе закономерностей. Интерпретация физического смысла полученных главных компонент и их вклад в общее описание рассматриваемой системы представлены в таблице 2. Полученные главные компоненты практически не связаны между собой. Лишь между второй и пятой главными компонентами наблю-

дается незначительная отрицательная связь ($R = -0,17$; $p < 0,05$).

Для выявления влияния полученных главных компонент на динамику биомассы рассматриваемых групп водорослей выполнен корреляционный анализ, результаты которого представлены в таблице 3.

Данные таблицы 3 показывают, что диатомовые водоросли меньше всех остальных таксонов связаны с гидролого-гидрохимическими особенностями среды. Уровень биомассы этих водорослей зависит лишь от уровня режима и продолжительности подледного периода, которые в совокупности обуславливают степень полноводности озера и, как правило, способствуют снижению концентрации растворенных веществ в водных массах.

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляции Спирмена между значениями главных компонент и показателями биомассы основных групп фитопланктона

Table 3. Spearman correlation coefficients between the values of the principal components and the algae groups biomass

	Сине-зеленые Cyanobacteria	Диатомовые Diatoma	Зеленые Chlorophyta
ГК 1 PC 1	-0,41	-0,05	-0,24
ГК 2 PC 2	-0,61	-0,03	-0,43
ГК 3 PC 3	-0,42	-0,27	-0,57
ГК 4 PC 4	0,02	-0,70	-0,08
ГК 5 PC 5	0,15	0,03	0,54

Примечание. Жирным шрифтом выделены достоверные значения ($p < 0,05$).

Note. Significant ones are given in bold ($p < 0.05$).

Для сине-зеленых водорослей главную роль играет вторая главная компонента, но значимыми также являются первая и третья. Таким образом, цианобактерии находятся в наиболее комплексной зависимости от условий среды. В реальности это означает, что данная группа микроводорослей наиболее интенсивно развивается в прозрачной воде, богатой растворенными в ней минеральными и органическими соединениями. Прозрачность необходима для осуществления процессов фотосинтеза, а минеральные и органические соединения служат строительным материалом для клеток водорослей. Продуктивность сине-зеленых водорослей возрастает в теплые периоды маловодной фазы и особенно в штилевую погоду, так как на прозрачность воды в мелководном Псковском озере большое влияние оказывают взвешенные вещества, концентрация которых повышается при ветровых воздействиях.

Сходными предпочтениями обладают и зеленые водоросли, однако для данной группы большое значение имеет рН среды и содержание в воде растворенного кислорода. В целом можно предположить, что, несмотря на довольно высокую схожесть динамики биомасс зеленых и сине-зеленых водорослей, последние гораздо более зависимы от содержания в воде растворенных органических и минеральных соединений, в то время как зеленые водоросли более чувствительны к кислотно-щелочному балансу водной среды.

Уровенный режим и продолжительность ледостава, по-видимому, напрямую не влияют на динамику биомассы сине-зеленых и зеленых водорослей, а отрицательную связь диатомовых с четвертой главной компонентой можно объяснить достаточно высокой «холодолюбивостью» данной группы по сравнению с двумя предыдущими.

Заключение

Полученные авторами данные по влиянию комплексных гидролого-гидрохимических условий среды на многолетнюю динамику биомассы трех таксонов водорослей позволили выявить ведущие комплексы переменных среды, которые в совокупности определяют степень развития в Псковском озере определенных таксономических групп микроводорослей. Показано, что в ряду главных характеристик среды, определяющих развитие сине-зеленых и в меньшей степени зеленых водорослей, находятся температурный режим и содержание в воде биогенов и легко-

окисляемых органических соединений, которые в процессе деструкции выступают в качестве дополнительных источников поступления в воду азота и фосфора. Полученные данные по сине-зеленым водорослям вполне согласуются с результатами эстонских исследователей [Laugaste et al., 2013]. Также показано отрицательное влияние на вышеперечисленные таксоны увеличения содержания в воде растворенного кислорода, который играет важную роль при аэробном разложении органики и снижает долю легкоокисляемых веществ в воде. Повышение температуры воды и маловодность последнего десятилетия стали возможной причиной усиления интенсивности «цветения» сине-зеленых водорослей в Псковском озере, увеличения их вклада в общую биомассу фитопланктона (до 90 % в июле 2021 г.). Следует отметить, что высокие показатели сине-зеленых водорослей в 2021 г. и определенные изменения в составе и структуре всего сообщества планктонных водорослей не нарушили его стабильности, определяемой по величине амплитуды колебаний среднемесячной биомассы ($V_{\text{макс}}/V_{\text{мин}}$) [Трифенова, 1986]. Зеленые водоросли также зависимы от содержания в воде биогенных веществ и органики, но более чувствительны к кислотно-щелочному балансу водной среды.

Вышеперечисленные факторы не оказывают существенного влияния на комплекс диатомовых водорослей, для которых значение имеет лишь уровенный режим и продолжительность подледного периода.

Литература

- Алекин О. А., Семенов А. Д., Скопинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
- Игнатъева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в Псковско-Чудском озере // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Матер. V Всерос. симпозиума с междунар. участием (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 99–103.
- Коросов А. В., Горбач В. В. Компьютерная обработка биологических данных: метод. пособие. Петрозаводск: ПетрГУ, 2007. 76 с.
- Лаугасте Р., Ныгес Т., Ястремский В., Тынно И. Водоросли // Псковско-Чудское озеро. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. С. 263–283.
- Лозовик П. А., Фрумин Г. Т. Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 3. С. 3–10. doi: 10.17076/lim626

Пузаченко Ю. Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях: учеб. пособ. для студ. вузов, обучающихся по геогр. и экологич. специальностям. М.: Academia, 2004. 408 с.

Слинчак А. И. Природные и антропогенные предпосылки развития ландшафтов Восточного Причудья // Псковский регионалогический журнал. 2012. № 143. С. 85–88.

Трифонов И. С. Сезонная и основная сукцессии озерного фитопланктона // Гидробиологический журнал. 1986. Т. 22, № 3. С. 21–28.

Унифицированные методы исследования качества вод: Методы химического анализа вод / СЭВ, Соевещ. руководителей водохоз. органов стран – членов СЭВ. 3-е изд., перераб. и доп. М., 1977. 176 с.

Ястремский В. В. Водоросли планктона Псковско-Чудского озера и их продукция в многоводные 1979–1980 гг. // Растительный покров Псковской области и вопросы его охраны. Л., 1983. С. 25–34.

Ястремский В. В. Структура и продуктивность фитопланктона Псковско-Чудского озера. СПб.: Изд-во ГосНИОРХ, 2016. 247 с.

Braeken J., van Assen M. A. L. M. An empirical Kaiser criterion // *Psychological Methods*. 2017. Vol. 22 (3). P. 450–466. doi: 10.1037/met0000074

Breton C., Blanchet P., Amor B., Beauregard R., Chang W.-S. Assessing the climate change impacts of biogenic carbon in buildings: A critical review of two main dynamic approaches // *Sustainability*. 2018. No. 10(6). Art. 2020. doi: 10.3390/su10062020

Laugaste R., Panksep K., Haldna M. Dominant cyanobacterial genera in Lake Peipsi (Estonia/Russia): Effect of weather and nutrients in summer months // *Estonian Journal of Ecology*. 2013. Vol. 62(4). P. 229–243. doi: 10.3176/eco.2013.4.01

Pant H. K. Nonlinear effects of climate change on phosphorus stability in wetlands: Concept and estimation // *J. Agric. Food Environ.* 2007. Vol. 5(1). P. 295–301. doi: 10.1234/4.2007.777

Tammeorg O., Nürnberg G., Horppila J., Haldna M., Niemistö J. Redox-related release of phosphorus from sediments in large and shallow Lake Peipsi: Evidence from sediment studies and long-term monitoring data // *J. Great Lakes Res.* 2020. Vol. 46(6). P. 1595–1603. doi: 10.1016/j.jglr.2020.08.023

References

Alekin O. A., Semenov A. D., Skopintsev B. A. Guidelines for chemical analysis of land water. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973. 269 p.

Braeken J., van Assen M. A. L. M. An empirical Kaiser criterion. *Psychological Methods*. 2017;22(3):450–466. doi: 10.1037/met0000074

Breton C., Blanchet P., Amor B., Beauregard R., Chang W.-S. Assessing the climate change impacts of biogenic carbon in buildings: A critical review of two main

dynamic approaches. *Sustainability*. 2018;10(6):2020. doi: 10.3390/su10062020

Ignat'eva N. V. The role of bottom sediments in the phosphorus cycle in Lake Peipus. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh: Mat-ly V Vseros. simpoziuma s mezhdunar. uchastiem (Petrozavodsk, 10–14 sentyabrya 2012 g.) = Organic matter and biogenic elements in inland waters and sea waters: Proceed. V All-Russian symposium with int. participation (Petrozavodsk, Sept. 10–14, 2012)*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. P. 99–103.

Korosov A. V., Gorbach V. V. Computer processing of biological data: Guidelines. Petrozavodsk: PetrGU; 2007. 76 p.

Laugaste R., Nyges T., Yastremskii V., Tynno I. Algae. *Pskovsko-Chudskoe ozero = Lake Peipus*. Tartu: Eesti Loodusfoto; 2012. P. 263–283.

Laugaste R., Panksep K., Haldna M. Dominant cyanobacterial genera in Lake Peipsi (Estonia/Russia): Effect of weather and nutrients in summer months. *Estonian Journal of Ecology*. 2013;62(4):229–243. doi: 10.3176/eco.2013.4.01

Lozovik P. A., Frumin G. T. Present-day state and permissible nutrient loadings on Lake Peipus. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2018;3:3–10. doi: 10.17076/lim626

Pant H. K. Nonlinear effects of climate change on phosphorus stability in wetlands: Concept and estimation. *J. Agric. Food Environ.* 2007;5(1):295–301. doi: 10.1234/4.2007.777

Puzachenko Yu. G. Mathematical methods in ecological and geographical research: A textbook for geography and ecology students. Moscow: Academia; 2004. 408 p.

Slinchak A. I. Natural and anthropogenic preconditions of development of landscapes of Eastern Prichudye. *Pskovskii regionologicheskii zhurnal = Pskov Journal of Regional Studies*. 2012;143:85–88.

Tammeorg O., Nürnberg G., Horppila J., Haldna M., Niemistö J. Redox-related release of phosphorus from sediments in large and shallow Lake Peipsi: Evidence from sediment studies and long-term monitoring data. *J. Great Lakes Res.* 2020;46(6):1595–1603. doi: 10.1016/j.jglr.2020.08.023

Trifonova I. S. Seasonal and main succession of lake phytoplankton. *Gidrobiologicheskii zhurnal = Journal of Hydrobiology*. 1986;22(3):21–28.

Unified methods for studying water quality: Methods of chemical analysis of waters. 3rd ed., rev. and enl. Moscow; 1977. 176 p.

Yastremskii V. V. Plankton algae of Lake Peipus and their production in high-water years in 1979–1980. *Rastitel'nyi pokrov Pskovskoi oblasti i voprosy ego okhrany = Vegetation cover of the Pskov Region and issues of its protection*. Leningrad; 1983. P. 25–34.

Yastremskii V. V. Structure and productivity of phytoplankton in Lake Peipus. St. Petersburg: Izd-vo GosNIORKh; 2016. 247 p.

Поступила в редакцию / received: 08.06.2022; принята к публикации / accepted: 02.10.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Михалап Сергей Геннадьевич

руководитель

e-mail: bibpskniorh@gmail.com; mikhailap_vniro@mail.ru

Воробьева Екатерина Михайловна

специалист

e-mail: katerinka0908@yandex.ru

Судницына Диана Николаевна

канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: diana.sudnitsyna@yandex.ru; pskovniro@vniro.ru

Борисов Владимир Валентинович

канд. биол. наук, доцент кафедры зоологии и экологии

e-mail: pq17@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Mikhailap, Sergey

Head of PskovNIRO

Vorob'eva, Ekaterina

Specialist

Sudnitsyna, Diana

Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Borisov, Vladimir

Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor at the Department of Zoology and Ecology

УДК 574.5.081.001(261.245)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ СОЕДИНЕНИЙ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭКОСИСТЕМЕ ВИСЛИНСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

К. А. Подгорный^{1*}, О. А. Дмитриева^{1,2}

¹ Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» (ул. Дмитрия Донского, 5, Калининград, Россия, 236022), *kapborok@mail.ru

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский пр-т, 36, Москва, Россия, 117997)

Рассмотрена общая структура имитационной модели, наиболее важные принципы описания процессов биогидрохимической трансформации соединений биогенных элементов (C, N, P, Si) и динамики растворенного кислорода в экосистеме Вислинского залива (ВЗ) Балтийского моря. По материалам многолетних наблюдений выполнена параметрическая настройка модели, проведена проверка ее адекватности и чувствительности к изменению значений параметров, рассчитана и проанализирована внутригодовая динамика соединений биогенных элементов, компонентов планктонного и бентосного звеньев экосистемы залива, количественно оценены величины времени оборота, а также потоков (балансов) растворенных и взвешенных веществ между выделенными компонентами модели. Модельными расчетами установлено, что по всем переменным имитационной модели получено достаточно хорошее качественное и количественное соответствие результатов моделирования данным непосредственных наблюдений. Практическая реализация вычислительных процедур настройки модели показала, что предлагаемые алгоритмы поиска параметров для биогидрохимического блока имитационной модели позволяют успешно решать оптимизационную задачу даже в условиях недостаточного объема данных наблюдений и сравнительно высокой их дисперсии. Необходимо обратить внимание на имеющиеся статистически достоверные межгодовые отличия значений эмпирических параметров модели. Следует с большой осторожностью использовать одни и те же значения модельных параметров при проведении вычислительных экспериментов для разных лет наблюдений и разработке прогнозов развития экосистемы залива при изменении внешних условий. Приведена количественная оценка значений времени оборота для модельных компонентов экосистемы ВЗ. Показано, что в подавляющем числе случаев имеются достоверные межгодовые различия значений времени оборота модельных переменных. Расчеты балансов растворенных органических веществ, а также азота, фосфора и кремния в составе детрита позволили сделать важный вывод о существенной роли гетеротрофного бактериопланктона и простейших организмов в процессах трансформации соединений биогенных элементов в экосистеме залива.

Ключевые слова: экосистема; биогенные элементы; гетеротрофный бактериопланктон; фитопланктон; зоопланктон; бентос; детрит; трофическая цепь; математическое моделирование; экологическая имитационная модель

Для цитирования: Подгорный К. А., Дмитриева О. А. Математическое моделирование процессов трансформации соединений биогенных элементов в экосистеме Вислинского залива Балтийского моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 142–160. doi: 10.17076/lim1605

Финансирование. Исследования проведены в рамках государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00007-22-00 часть II, раздел 5 «Осуществление государственного мониторинга водных биологических ресурсов во внутренних водах, в территориальном море Российской Федерации, на континентальном шельфе Российской Федерации и в исключительной экономической зоне Российской Федерации, в Азовском и Каспийском морях» и государственного задания ИО РАН им. П. П. Ширшова № FMWE-2021-0007 «Морские и океанские экосистемы в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия: структура и биологическая продуктивность экосистемы Арктического бассейна и морей России, экосистемы и потенциальные биологические ресурсы открытого океана».

K. A. Podgorny^{1*}, O. A. Dmitrieva^{1,2}. MATHEMATICAL MODELING OF THE TRANSFORMATIONS OF NUTRIENT COMPOUNDS IN THE VISTULA LAGOON ECOSYSTEM, BALTIC SEA

¹ Atlantic Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography “VNIRO” (5 Dm. Donskogo St., 236022 Kaliningrad, Russia), *kapborok@mail.ru

² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (34 Nakhimovsky Ave., 117997 Moscow, Russia)

The article describes the general structure of the simulation model, the most important principles for describing the processes of bio-hydrochemical transformation of nutrient (C, N, P, Si) compounds, and the dynamics of dissolved oxygen in the ecosystem of the Vistula Lagoon (VL), Baltic Sea. Based on the results of long-term observations, tuning of the model parameters was performed, its adequacy and sensitivity to changes in parameter values were checked, within-year variations of nutrient compounds, components of the planktic and benthic parts of the VL ecosystem, turnover periods, as well as fluxes (balances) of dissolved and suspended solids between the selected components of the model were calculated and analyzed. Model calculations showed fairly good qualitative and quantitative correspondence of the simulated results to observed data for all variables of the simulation model. Practical implementation of computational procedures for model tuning proves that with the proposed algorithms for finding the parameters for the bio-hydrochemical block of the simulation model the optimization problem can be solved effectively even where the amount of observed data is insufficient and their variance is rather high. Attention should be given to statistically significant among-year variations in the values of the empirical parameters of the model. One should be cautious using the same values of model parameters in running computational experiments for different years of observations and in predicting VL ecosystem development in response to changes in external conditions. We quantified turnover times for the model components of the VL ecosystem. In a vast majority of cases there existed significant among-year variations in the turnover times for the model variables. Calculations of the balances of dissolved organic substances, as well as detrital nitrogen, phosphorus, and silicon have led us to an important conclusion that heterotrophic bacterioplankton and protozoa play a significant role in the processes of nutrient compound transformation in the lagoon ecosystem.

Keywords: ecosystem; nutrients; heterotrophic bacterioplankton; phytoplankton; zooplankton; benthos; detritus; trophic chain; mathematical modeling; ecological simulation model

For citation: Podgorny K. A., Dmitrieva O. A. Mathematical modeling of the transformations of nutrient compounds in the Vistula Lagoon ecosystem, Baltic Sea. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 142–160. doi: 10.17076/lim1605

Funding. The studies were carried out under state assignment to the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography “VNIRO” Atlantic Branch of VNIRO

("AtlantNIRO") No. 076-00007-22-00 part II, section 5 "Implementation of state monitoring of aquatic biological resources in inland waters, in the territorial sea of the Russian Federation, on the continental shelf of the Russian Federation and in the exclusive economic zone of the Russian Federation, in the Azov and the Caspian Seas" and under state assignment to Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences No. FMWE-2021-0007 "Marine and ocean ecosystems in a changing climate and under anthropogenic impact: the structure and biological productivity of the ecosystem of the Arctic Basin and seas of Russia, mid-ocean ecosystems and potential biological resources".

Введение

Вислинский залив (ВЗ) расположен в юго-восточной части побережья Балтийского моря в глубине Гданьского залива (рис. 1). Он представляет собой узкую, вытянутую вдоль берега лагуну. Площадь водного зеркала залива составляет 838 км², из которых 473 км²

(~56 %) относится к российской части акватории [Гидрометеорологический..., 1971; Transboundary..., 2008]. Объем его котловины – около 2,3 км³, максимальная глубина – 5,2 м, средняя – 2,7 м. От Гданьского залива Балтийского моря залив отделяется песчаной косой и соединяется с ним узким проливом (шириной 400 м и глубиной 8–12 м).

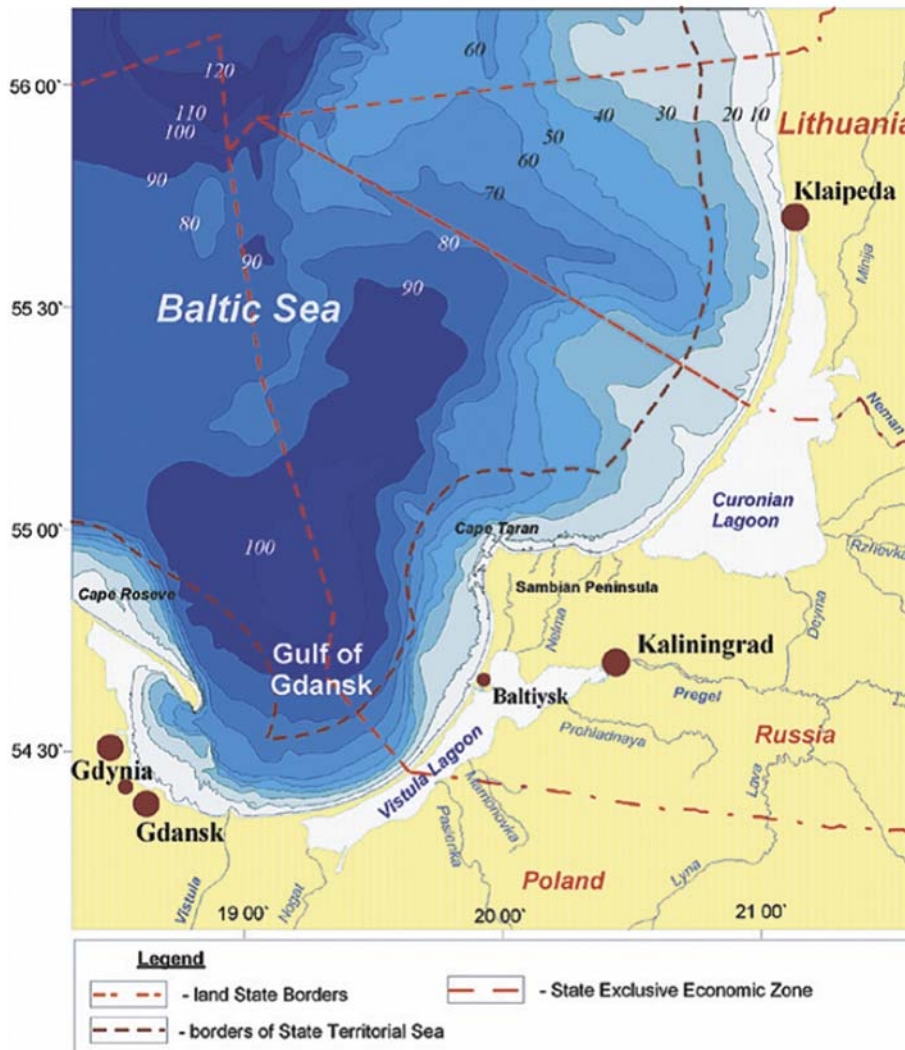


Рис. 1. Географическое положение Вислинского залива [Transboundary..., 2008]
 Fig. 1. Geographical location of the Vistula lagoon [Transboundary..., 2008]

Гидрологический режим ВЗ определяется метеорологическими условиями, водообменом с Балтийским морем, незначительным поступлением речных вод и его мелководностью [Гидрометеорологический..., 1971]. По геоморфологическим и гидрологическим признакам ВЗ можно отнести к лагунным экосистемам «полуоткрытого» типа. Такое его соотношение обусловлено интенсивным притоком морских вод на фоне слабого речного стока и фронтальным положением морского пролива относительно преобладающих ветров западных направлений.

На формирование температурного режима вод ВЗ оказывают влияние в основном климатические условия района. Прогрев воды начинается уже ранней весной. Существенное повышение температуры воды происходит в марте. Максимальный прогрев отмечается в июле (до 23 °С). В ноябре температура воды понижается до 1–3 °С. Для залива в целом характерна гомотермия, которая обусловлена мелководностью залива и достаточно активным и интенсивным процессом ветрового перемешивания.

Прозрачность воды ВЗ вследствие небольших его глубин, частых волнений, взмучивающих донные осадки, и высокого содержания органической и неорганической взвеси довольно небольшая [Гидрометеорологический..., 1971; Чечко, 2002; Александров, 2010]. Изменчивость прозрачности зависит от степени волнения, особенностей распределения речной и морской воды, характера течений и степени развития фитопланктона [Чечко, 2002; Chubarenko et al., 2002].

Ежегодно в ВЗ поступают большие объемы различных форм азота и фосфора [Александров, 2010]. Залив является аккумулятором, своеобразной «ловушкой» осадочного вещества, в том числе и загрязняющих веществ.

ВЗ можно классифицировать как опресненный морской водоем. Среднемноголетняя соленость в заливе – 3,7 ‰. Она может колебаться в достаточно широких пределах [Александров, 2010]. Ее пространственно-временная динамика зависит от направления и силы ветра. При устойчивых ветрах западного и северного направления резко возрастает заток морских вод, что обуславливает повышение солености в центральной части залива до 6–8 ‰ [Гидрометеорологический..., 1971; Transboundary..., 2008].

ВЗ имеет большое рыбохозяйственное значение. Он играет важную роль в воспроизводстве запасов целого ряда промысловых видов рыб [Кейда, 2004]. Трансграничное положение залива диктует необходимость выстраивания

паритетных отношений между Россией и Польшей в вопросах изучения и рационального использования водных биологических ресурсов залива, а также сохранения и улучшения его экологического состояния [Chubarenko, Margoński, 2008; Transboundary..., 2008; Witek et al., 2010]. Совместное проведение мониторинговых и количественных комплексных исследований фундаментальных экологических проблем функционирования экосистемы залива позволяет выйти на качественно новый уровень понимания его естественного состояния и реакции на изменения природных факторов и антропогенные воздействия. Наиболее сложные задачи связаны с изучением процессов биогидрохимической трансформации веществ в заливе, последствий загрязнения и механизмов самоочищения водной среды. Поэтому их решение с помощью методологии системного анализа и математического моделирования представляется особенно актуальным и назревшим для изучения.

К настоящему времени для ВЗ имеется только зарубежный опыт разработки и применения пространственно неоднородной имитационной модели для оценки качества водной среды [Delft..., 2005; Witek et al., 2010]. Однако всесторонняя проверка работоспособности модели Delft 3D WAQ, которая была выполнена в работе [Witek et al., 2010] для периода 1998–2000 гг., выявила ряд существенных недостатков этой модели.

Основным минусом можно назвать выбор упрощенной структуры модели и вследствие этого – недостаточно полное и адекватное описание многих важных механизмов процессов биогидрохимической трансформации тех соединений биогенных элементов, которые в этой модели рассматривали в качестве модельных переменных. Кроме того, имелся ряд принципиальных и трудноустраняемых сложностей. Они были связаны с подготовкой исходных данных наблюдений [Подгорный, 2018].

При разработке математической модели экосистемы ВЗ, формировании ее структуры и параметризации процессов необходимо принять во внимание следующие общие особенности всех имеющихся в настоящее время исходных данных [Подгорный, 2018]: 1) существует достаточно высокий (в среднем 10–30 %, а в ряде случаев и до 60–80 %) статистический разброс данных относительно их средних значений [Witek et al., 2010]; 2) проведение предварительного нелинейного корреляционного анализа показало, что для различных выявленных и статистически значимых взаимосвязей гидрохимических и гидробиологических ком-

понентов водной экосистемы ВЗ имеет место высокая их временная изменчивость (как внутри-, так и межгодовая). При этом могут различаться не только математическая форма корреляционных зависимостей, но также и сила связи; 3) ряд важных для построения модели параметров и данных наблюдений либо отсутствует совсем, либо был получен в результате эпизодических измерений; 4) некоторые данные получены с нарушением принципа синхронности проведения наблюдений (особенно это относится к данным по рекам) [Witek et al., 2010]; 5) ряд данных необходимо привлекать из литературных источников; 6) из-за имеющихся пропусков в данных (как по времени, так и по пространству) необходимо проводить соответствующие процедуры интерполяции и/или экстраполяции, для того чтобы получить соответствующие значения данных в нужной точке пространства на необходимый момент времени; 7) существует ряд показателей, которые могут быть получены не в результате их прямых измерений, а путем пересчета (с той или иной степенью погрешности) из других измеренных в водной среде величин.

Основная цель данной работы состоит в том, чтобы разработать принципиально иной, отличный от имеющейся модели Delft 3D WAQ вариант структуры пространственно неоднородной имитационной математической модели для последующего модельного исследования процессов биогидротрансформации форм углерода, азота, фосфора, кремния и динамики растворенного кислорода в воде ВЗ, а также в деятельном слое донных отложений (ДО). При разработке имитационной модели ВЗ как открытой водной системы реализовано принципиальное положение о том, что необходимо совместное моделирование динамики компонентов биологической системы и среды ее функционирования [Подгорный, 2003, 2018]. Оно может быть реализовано на основе синтеза имеющихся гидробиологических, гидрохимических и гидрофизических знаний о наиболее важных процессах, которые протекают в экосистеме залива.

Материалы и методы

Описание принципов построения и основных структурных блоков имитационной модели Вислинского залива

Вопросы методики, которые касаются разработки структуры математической модели ВЗ, формирования базы данных гидрохимических и гидробиологических наблюдений, под-

готовки входных данных по гидрологическому и гидрометеорологическому режимам залива подробно рассмотрены ранее [Подгорный, 2018]. Формирование структуры имитационной модели выполнено по материалам многолетних исследований экосистемы ВЗ, которые представлены в ряде публикаций [Гидрометеорологический..., 1971; Ежова и др., 2004; Науменко, 2007; Александров, 2010; Chubarenko, Margoński, 2008; Witek et al., 2010]. Настройка модели и последующие модельные расчеты осуществлены для периода 1998–2000 гг. по данным, которые представлены в работе [Witek et al., 2010]. Для подготовки файлов входных данных использована процедура сплайн-интерполяции [Подгорный, 2000, 2018]. Поскольку в исходных данных имеет место существенный их статистический разброс, то при выполнении интерполяции дополнительно использованы еще и алгоритмы моделирования нормально распределенных случайных величин [Брандт, 2003]. Применение процедур статистического моделирования позволило создать стохастические ансамбли входных данных и тем самым учесть наблюдающуюся их природную изменчивость.

Имитационная модель экосистемы ВЗ включает в себя несколько базовых блоков [Подгорный, 2018]. Основным структурным компонентом всей модели является ее биогидрохимический блок. Он позволяет количественно исследовать механизмы процессов биогидрохимической трансформации соединений углерода, азота, фосфора, кремния и динамики растворенного кислорода в экосистеме залива в результате взаимодействия компонентов экосистемы при совместном воздействии природных и антропогенных факторов. Процессы трансформации биогенных веществ описаны совместно для разных сред – как для водной среды, так и для верхнего (деятельного) слоя донных отложений (ДО). Биогидрохимический блок состоит из двух частей: «Планктонного блока» и блока «Бентос».

Разработка структуры бентосного блока имитационной модели ВЗ выполнена на основе тех же самых методологических принципов и подходов, которые были использованы и при построении планктонного блока модели. Это придает всей структуре модели внутреннее логическое единство и функциональное единство в описании биогидрохимических процессов. При выполнении модельных расчетов планктонный и бентосный блоки модели используются одновременно. Объединение двух этих блоков в единый биологический блок происходит через соответствующие потоки

вещества, которые определяют скорости изменения тех или иных компонентов модели в результате процессов их биогидрохимической трансформации.

Рассмотрение взаимосвязанной и взаимозависимой совокупности процессов, которые количественно формализованы в планктонном и бентосном блоках имитационной модели, чрезвычайно важно. Интегрированное рассмотрение процессов на разных трофических уровнях позволяет дать более полную и всестороннюю количественную оценку своеобразия условий и особенностей формирования сырьевой базы питания рыб и уровня биологической продуктивности акватории ВЗ.

В зависимости от целей модельного исследования и решаемых при этом задач биогидрохимический блок имитационной модели можно использовать в нескольких вариантах. Пространственно однородный вариант («точечная» модель) – более простой в использовании. Его можно применять, например, в процедурах настройки (подбора значений эмпирических параметров) модели, для решения некоторых задач прогноза, расчета интегральных показателей качества водной среды и оценки кормовой базы рыб. С помощью пространственно неоднородного варианта модели (пространственно распределенной модели) можно детально изучать специфику развития биогидрохимических процессов в разных частях акватории ВЗ, механизмов формирования пространственно неоднородного распределения гидрохимических и биотических компонентов его экосистемы.

Во вспомогательных блоках модели производится задание значений эмпирических параметров модели; импортирование необходимых метеорологических, гидрологических, гидрохимических данных (скорость и направление ветра, температура и соленость воды, интенсивность солнечной радиации на водной поверхности, внешняя биогенная нагрузка, речной сток, водообмен с Гданьским заливом Балтийского моря), данных натуральных наблюдений и начальных данных; расчет времени оборота и потоков растворенных и взвешенных веществ между выделенными компонентами модели; осуществляется графическое представление результатов моделирования; производится экспортирование результатов расчетов в таблицы Excel. Имеется также важный вспомогательный блок, который позволяет в автоматическом режиме осуществить процедуры настройки (калибровки) модели, то есть выполнить подбор ряда эмпирических параметров имитацион-

ной модели по имеющимся рядам данных непосредственных наблюдений [Подгорный, 2003; Podgorny, Leonov, 2015].

В имитационной модели изучается внутригодовая динамика циклов сразу нескольких биогенных элементов. Поэтому в ней биомассы планктонных и бентосных организмов одновременно выражены в нескольких единицах [Подгорный, 2018]: гетеротрофный бактериопланктон – в единицах С, N, P, Si; простейшие, диатомовые водоросли, мирный зоопланктон, хирономиды, олигохеты, полихеты, моллюски, мизиды – в единицах N, P, Si; синезеленые и зеленые водоросли, мирный зоопланктон, макрофиты – в единицах N, P. В планктонном блоке имитационной модели рассматриваются 45 переменных состояния. Из них 35 переменных относятся к водной среде и 10 – к донным отложениям. В блоке «Бентос» модели экосистемы ВЗ рассматриваются 15 переменных состояния. При разработке структуры биогидрохимического блока имитационной модели и каждой из его частей использованы результаты многолетних натуральных гидрохимических и гидробиологических исследований как российской, так и польской частей залива [Witek et al., 2010]. Предложенный в модели химико-кинетический аппарат позволяет изучать сложные биохимические, химические и физико-химические процессы и осуществлять математическое моделирование биогидротрансформации биогенных веществ в их взаимосвязи, системно.

В имитационной модели адекватная математическая формализация и системное описание взаимосвязанных биогидрохимических процессов позволяют количественно изучать циклы соединений важнейших биогенных элементов – углерода, азота, фосфора, кремния, а также динамику растворенного в воде кислорода. Это дает возможность исследовать механизмы сопряжения различных циклов при анализе закономерностей взаимосвязанной динамики биомасс гидробионтов, величин их продукции, метаболических выделений, скоростей отмирания и концентраций биогенных веществ в водной среде [Подгорный, 2018]. Таким образом, модель фактически воспроизводит переходные процессы и позволяет описывать реакцию водной экосистемы на изменения условий среды обитания и/или хотя бы одного из учитываемых в модели факторов (изменение температуры и солености воды, водного режима, освещенности водной поверхности, биогенной нагрузки, гидродинамического воздействия, оседания взвесей, ресуспензии, биотурбации верхнего слоя ДО).

В данной работе использован только пространственно однородный вариант модели. Для каждого из трех лет (1998, 1999 и 2000 гг.) все модельные расчеты проводили для периода с 1 января по 31 декабря с шагом по времени равным 0,1 сут. Начальные значения переменных планктонного и бентосного блоков имитационной модели при проведении процедур оптимизации (поиска параметров) задавали двумя способами. В том случае, когда имелась информация о данных непосредственных наблюдений (среднегодовые данные или данные на конкретный год выполнения калибровочных расчетов),

брали данные наблюдений. Если же по каким-то модельным переменным данные наблюдений отсутствовали, их считали оцениваемыми параметрами. В этом случае по этим переменным начальные значения и диапазон изменения задавали путем экспертных оценок, а для поиска их уточненных значений, как и для других эмпирических параметров модели, использовали процедуры оптимизации (калибровки).

В качестве показателя адекватности модели использован критерий Тейла [Theil, 1971], значение которого зависит от некоторого множества \vec{p} параметров модели:

$$f(\vec{p}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{obs}} (C_{n_{obs}} - C_{n_{sim}})_i^2} / \left(\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{obs}} C_{n_{obs}}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{obs}} C_{n_{sim}}^2} \right), n = \overline{1, N},$$

где $C_{n_{obs}}$ – наблюдаемые значения переменной (концентраций веществ или биомасс биотических компонентов экосистемы); $C_{n_{sim}}$ – рассчитанные значения переменной, полученные в результате моделирования; N_{obs} – количество измерений экспериментальных данных; N – количество тех переменных модели, для которых имеются данные наблюдений. Значения целевой функции $f(\vec{p})$ могут меняться от нуля до единицы. При полном совпадении модельных и наблюдаемых значений $f(\vec{p}) = 0$, при полном несовпадении – единице. В том случае, если необходимо минимизировать отклонения модельных значений от наблюдаемых по многим переменным (а именно это и имеет место при выполнении процедур поиска наилучших параметров модели), то желательно использовать взвешенное среднее по N переменным значение этого критерия с весовыми коэффициентами w_j :

$$\langle f(\vec{p}) \rangle = \sum_{j=1}^N (w_j \times f_j(\vec{p})).$$

Весовые коэффициенты определяются при этом по формуле:

$$w_j = f_j(\vec{p}) / \sum_{i=1}^N f_i(\vec{p}), j = \overline{1, N}.$$

Автоматический подбор параметров биогидрохимического блока имитационной модели формализован в виде двухэтапного алгоритма прямого поиска [Подгорный, 2003; Podgornyi, Leonov, 2015]. На первом этапе применяется алгоритм случайного поиска, который проводится в пределах всего пространства параметров (глобально). Его задача состоит в отыскании возможной области существования глобально-

го минимума целевой функции в заданном параметрическом пространстве. На втором этапе выполняется локальный поиск. Для этого использован модифицированный симплексный метод Нелдера – Мида [Nelder, Mead, 1965]. Локальный поиск уточняет положение минимума целевой функции, найденное на первом этапе работы алгоритма.

Для каждого модельного года (1998, 1999 и 2000 гг.) проводили по 25 вычислительных экспериментов по подбору параметров. Наилучшим в каждой серии из 25 вычислительных экспериментов считали тот набор оцениваемых параметров, для которого величина $\langle f(\vec{p}) \rangle$ была наименьшей. Всего оценивали 330 эмпирических параметров модели.

Исследование чувствительности модели к изменению значений тех или иных параметров проводили следующим образом. Для каждого модельного года по результатам 25 вычислительных экспериментов по подбору параметров для каждого суток модельного времени рассчитывали коэффициент вариации по всем переменным модели. Затем по каждой переменной вычисляли средний коэффициент вариации $(\overline{CV})_i, i = \overline{1, N}$ за весь модельный период и полученные величины суммировали, то есть рассчитывали величину $(\overline{CV})_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N (\overline{CV})_i$.

По результатам 25 экспериментов для каждого из 330 оцениваемых нами параметров рассчитывали коэффициент вариации $(CV_p)_j, j = \overline{1, 330}$, который характеризовал степень его изменчивости. Мерой чувствительности модели к изменению каждого из модельных параметров (в относительных единицах) являлось отношение $(\overline{CV})_{\Sigma} / (CV_p)_j, j = \overline{1, 330}$.

Результаты и обсуждение

Оценка соответствия модели данным непосредственных наблюдений

Модельные расчеты показали, что в основном по всем переменным имитационной модели ВЗ получено достаточно хорошее соответствие результатов моделирования данным непосредственных наблюдений. Средние значения критерия Тейла для модельных переменных обычно были менее 0,2 и только в отдельных случаях находились в пределах 0,25–0,31. Это позволяет сделать вывод о том, что основные процессы трансформации соединений углерода, азота, фосфора и кремния, а также динамики растворенного в воде кислорода воспроизводятся имитационной моделью вполне корректно. Минимальные значения осредненного по отдельным переменным модели критерия Тейла для периода 1998–2000 гг. менялись от 0,163 до 0,182, максимальные – от 0,173 до 0,19, а средние – от 0,168 до 0,185. Степень изменчивости осредненных значений критерия невелика. Коэффициенты вариации для них менялись от 1,08 до 1,6 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемые алгоритмы поиска параметров для биогидрохимического блока имитационной модели позволили в целом успешно решить оптимизационную задачу даже в условиях недостаточного объема данных наблюдений и сравнительно высокой их дисперсии. Сложность решаемой задачи была обусловлена несколькими причинами: наличием большого числа эмпирических параметров; существенной нелинейностью системы уравнений математической модели; сложностью выбора и расчета целевой функции, для которой особенности ее топологической структуры заранее неизвестны; необходимостью обеспечить выполнение значительного числа ограничений в виде неравенств; привлечением данных наблюдений разного качества и разного временного разрешения. Тем не менее предлагаемые алгоритмы оптимизации доказали свою эффективность, надежность и обеспечили сходимость получаемых результатов.

По результатам проведения однофакторного дисперсионного анализа было установлено, что в 15 % от всего исследованного набора эмпирических параметров имитационной модели экосистемы ВЗ межгодовые различия значений параметров статистически достоверны. Поэтому следует с большой осторожностью использовать одни и те же значения модельных параметров при проведении вычислительных экспериментов для разных лет.

Оценка чувствительности имитационной модели ВЗ к изменению значений модельных параметров

Расчеты коэффициентов чувствительности показали, что наиболее высокая чувствительность модели к изменению значений параметров в разные годы связана с одними и теми же группами модельных параметров. К ним относятся коэффициенты смертности бентосных организмов; скорости обменных процессов на границе вода-ДО; коэффициенты функций температурной коррекции скоростей процессов; скорости седиментации взвесей и ресуспензии верхнего слоя ДО.

Таким образом, можно указать на ведущие группы параметров, которые во многом определяют качество настройки модели. Именно на эти коэффициенты, на их правильную количественную оценку следует обращать особое, первостепенное внимание. Есть основания полагать, что группы ведущих параметров, которые наиболее сильно влияют на чувствительность модели, во многом зависят от структуры модели. Кроме того, параметрическая чувствительность модели может быть обусловлена межгодовыми изменениями условий функционирования экосистемы и последующими за этим перестройками ее структуры, перераспределениями потоков и времени оборота веществ внутри экосистемы. Рассмотрение этих непростых методических вопросов требует дополнительных исследований.

*Внутригодовая динамика содержания хлорофилла *a* в водной среде*

Внутригодовая динамика содержания хлорофилла *a* в водной среде по данным моделирования и многолетних наблюдений за период 1998–2000 гг. показана на рис. 2. На нем синяя линия соответствует модельным расчетам, которые относятся к 1998 г., зеленая – к 1999 г., красная – к 2000 г., а оливковой линией показаны осредненные за три года данные. В ходе дальнейшего изложения на рис. 3–6 будут использованы аналогичные цветовые обозначения.

При выполнении модельных расчетов концентрация хлорофилла *a* в воде ВЗ была одним из тех показателей, по которым производилась параметрическая настройка модели. Важность этого показателя состояла в том, что с его помощью выполняли «подстройку» модели для расчета оптических характеристик водной среды ВЗ, а также расчета глубины видимости белого диска, который характеризует прозрачность воды в заливе.

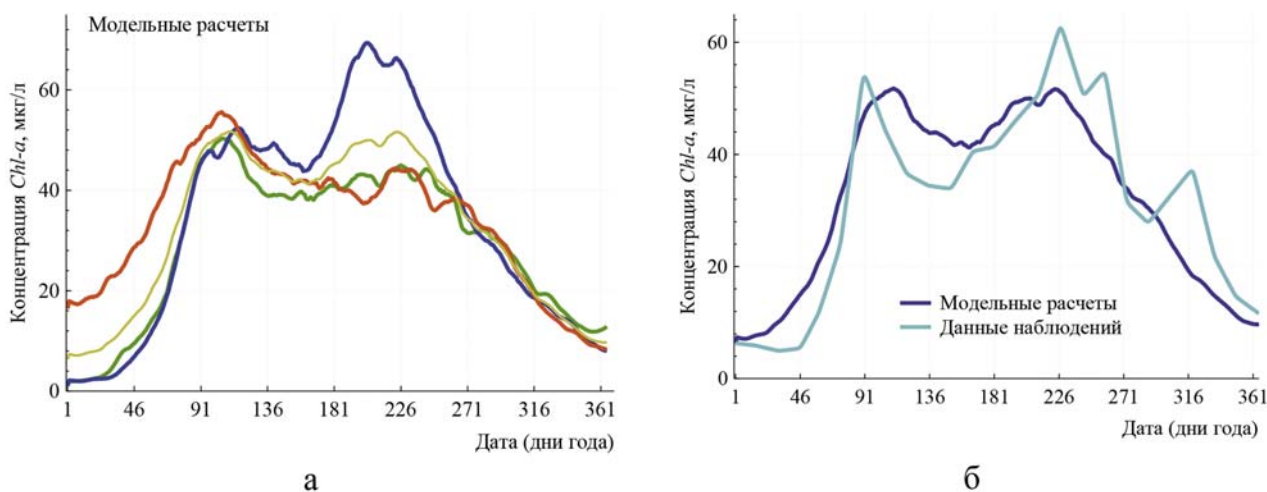


Рис. 2. Внутригодовая динамика содержания хлорофилла *a* в водной среде за период 1998–2000 гг.: а – данные моделирования; б – сравнение среднемноголетних значений хлорофилла *a* в водной среде по данным наблюдений и моделирования

Fig. 2. Intra-annual dynamics of the content of chlorophyll *a* in the aquatic environment for the period 1998–2000: а – modeling data; б – comparison of the average long-term values of chlorophyll *a* in the aquatic environment according to the observational and modeling data

Полученные модельные данные свидетельствуют о хорошем их соответствии данным непосредственных наблюдений – как качественном, так и количественном. В ходе проведения вычислительных экспериментов по параметрической настройке модели было установлено, что средние значения критериев Тейла для концентрации хлорофилла *a* в воде менялись в пределах от 0,121 до 0,149. Важно отметить совпадение положения максимальных значений концентрации хлорофилла *a* (август) с периодом максимального фотосинтеза в ВЗ [Александров, 2010]. Это является дополнительным подтверждением правильности расчетов по модели.

Внутригодовая динамика содержания растворенных минеральных форм азота и фосфора в водной среде

Основными гидрохимическими показателями эвтрофирования водоемов служат уровни концентраций в воде азота и фосфора. Их содержание и пространственное распределение в ВЗ зависит от взаимодействия ряда факторов. Внутригодовая динамика содержания растворенных минеральных форм азота (сумма $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$) и фосфора (DIP) в водной среде показана на рис. 3.

Содержание в воде ВЗ аммиачного азота достаточно невелико. Максимумы NH_4^+ (0,06–0,09 мг/л в среднем по заливу) отмечаются в

начале лета после весеннего пика в развитии фитопланктона, а также в ноябре, когда почти полностью прекращается процесс вегетации водорослей и начинается период разложения их биомассы. В остальные месяцы содержание NH_4^+ в среднем по Вислинскому заливу сохраняется на уровне 0,03–0,05 мг/л. В ходе проведения вычислительных экспериментов по параметрической настройке модели было установлено, что средние значения критериев Тейла для концентрации NH_4^+ менялись в пределах от 0,197 до 0,312. Более высокие значения критерия для NH_4^+ связаны с сильной изменчивостью концентрации аммонийного азота в водной среде ВЗ в весенний период.

Содержание в воде ВЗ азота нитратов – основной формы минерального азота – подтверждено четко выраженной сезонной изменчивости [Александров, 2010]. Данные моделирования эту временную динамику воспроизводят качественно и количественно правильно. По имеющимся данным многолетних наблюдений за период с 1998 по 2000 г., весенний максимум концентраций NO_3^- наблюдается в марте и меняется от 0,7 до 1,35 мг/л в среднем по заливу. Максимум NO_3^- по данным моделирования попадает в этот диапазон значений и правильно воспроизводит положение максимума концентрации NO_3^- . Увеличение содержания NO_3^- в воде в этот период года обусловлено зимней аккумуляцией азота нитратов и поступлением

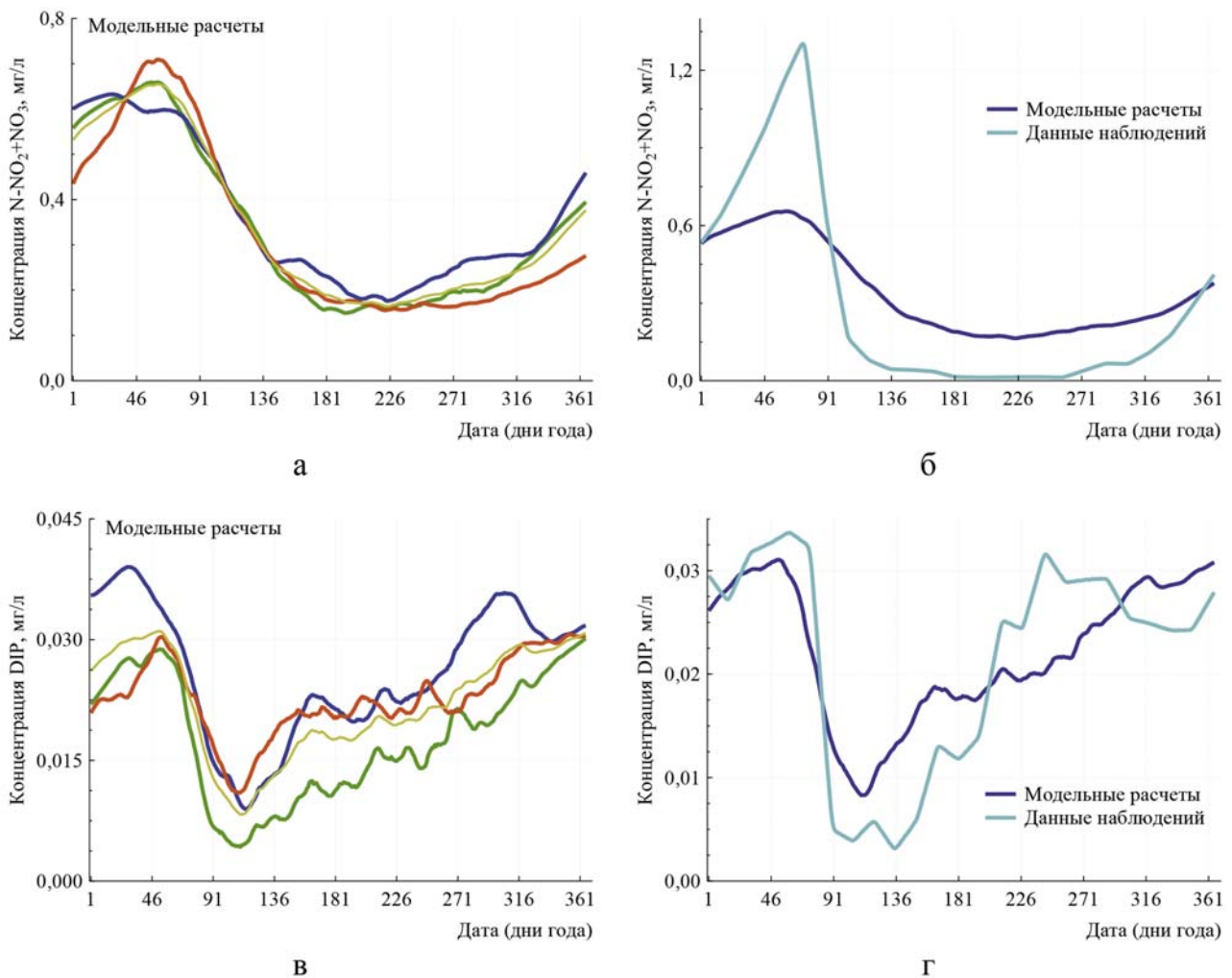


Рис. 3. Внутригодовая динамика содержания растворенных минеральных форм азота и фосфора в водной среде за период 1998–2000 гг.: а, в – данные моделирования; б, г – сравнение среднемноголетних значений $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ и DIP в водной среде по данным наблюдений и моделирования

Fig. 3. Intra-annual dynamics of the content of dissolved mineral forms of nitrogen and phosphorus in the aquatic environment for the period 1998–2000: а, в – modeling data; б, г – comparison of the mean annual values $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ and DIP in the aquatic environment according to the observational and modeling data

паводковых вод в залив. С началом активной фазы вегетации фитопланктона и связанным с этим увеличением скорости потребления азота нитратов фитопланктонными организмами, а также за счет повышения интенсивности водообмена между заливом и морем содержание нитратов в воде залива резко снижается. Минимум содержания NO_3^- отмечается в июне-июле и составляет 0,015–0,028 мг/л. Низкие значения концентраций NO_3^- сохраняются до октября. И лишь в ноябре, после сильного похолодания и почти полного прекращения вегетации водорослей, содержание нитратов возрастает до значений > 0,2–0,3 мг/л, а затем начинается процесс зимней аккумуляции NO_3^- .

Содержание в воде Вислинского залива азота нитритов (промежуточного соединения биохимического окисления аммонийного азота) незначительно [Александров, 2010]. Максимальные концентрации NO_2^- наблюдаются в марте–апреле – до момента начала активной фазы вегетации фитопланктона – и достигают значений 0,01–0,016 мг/л в среднем по заливу. Минимальные концентрации NO_2^- (около 0,001 мг/л) имеют место с мая по сентябрь.

Для количественной оценки качества модели по NO_2^- и NO_3^- рассматривали их сумму. В ходе проведения вычислительных экспериментов по параметрической настройке модели было установлено, что средние значения

критериев Тейла для суммарной концентрации NO_2^- и NO_3^- менялись в пределах от 0,269 до 0,288. Более высокие значения критерия для суммы NO_2^- и NO_3^- (так же как и для концентрации NH_4^+) связаны со значительной ее изменчивостью в водной среде ВЗ в весенний период. По всей видимости, для более корректного описания внутригодовой динамики соединений минерального азота в имитационную модель в будущем необходимо внести дополнения и учитывать также процессы на водосборе залива (биогенную нагрузку с водосборной территории).

Сезонный ход содержания минерального фосфора по данным за период 1998–2000 гг. характеризуется следующими основными особенностями. Весенний максимум концентраций растворенного минерального фосфора (DIP) в воде ВЗ наблюдается в марте (0,03–0,04 мг/л в среднем по заливу) за счет зимней аккумуляции, а также поступления паводковых вод в залив. Заметим, что по многолетним данным за более длинный период 1978–2009 гг. весенний максимум DIP может меняться в более широких пределах – 0,04–0,05 мг/л [Подгорный, 2018]. После начала активной вегетации фитопланктона происходит снижение DIP до минимальных значений (0,005–0,01 мг/л в апреле–июле). В июле–августе концентрация DIP вновь возрастает и достигает величин 0,03–0,035 мг/л. По многолетним данным за период 1978–2009 гг. летний максимум DIP, так же как и весенний, может меняться в более широких пределах – 0,04–0,075 мг/л [Подгорный, 2018].

Полученные модельные данные внутригодовой динамики в различные годы свидетельствуют о хорошем их соответствии данным непосредственных наблюдений – как качественном, так и количественном. В ходе проведения вычислительных экспериментов по параметрической настройке модели установлено, что средние значения критериев Тейла для DIP менялись в пределах от 0,137 до 0,209. Важно отметить совпадение положения максимальных и минимальных значений концентрации DIP. Это является дополнительным подтверждением правильности расчетов по модели и соответствия фазам развития химико-биологических процессов в воде ВЗ.

Внутригодовая динамика содержания растворенного органического азота, фосфора и кремния в водной среде

Внутригодовая динамика содержания DON, DOP и DOSi в воде ВЗ по данным моделирования и данным многолетних наблюдений по-

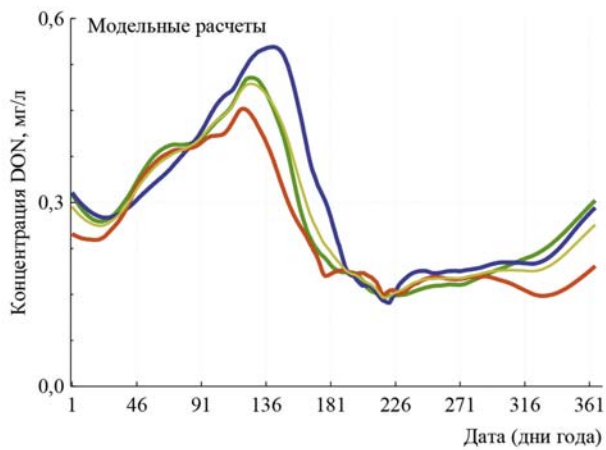
казана на рис. 4. Обращает на себя внимание существенная временная изменчивость концентраций DOP и DOSi . Модель не воспроизводит детально все пики. Как и всякая модель, она играет роль своеобразного «фильтра» или «скользящего среднего», усредняющего реальные данные наблюдений. Тем не менее в среднем видно, что модель правильно воспроизводит основные особенности внутригодовой динамики содержания растворенных органических форм азота, фосфора и кремния.

В ходе проведения вычислительных экспериментов по параметрической настройке модели установлено, что средние значения критериев Тейла для DON менялись от 0,118 до 0,138; для DOP – от 0,115 до 0,179; для DOSi – от 0,186 до 0,230. Это позволяет сделать вывод о том, что основные процессы трансформации растворенных органических соединений азота, фосфора и кремния воспроизводятся имитационной моделью вполне корректно.

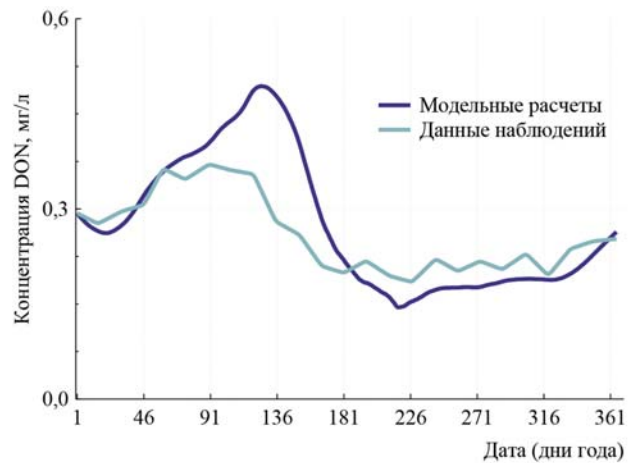
Внутригодовая динамика содержания растворенного кислорода и его процентного насыщения в водной среде

Кислородный режим залива определяется интенсивностью биогидрохимических процессов, мелководностью залива, взаимодействием с морем и процессами загрязнения. Из-за мелководности водные массы ВЗ хорошо перемешиваются и аэрируются. При возрастании ветровой нагрузки усиливаются процессы обмена кислородом между водой и верхним слоем ДО. На рис. 5 показана сезонная динамика концентрации растворенного в водной среде кислорода и его процентного содержания по данным моделирования и многолетних наблюдений за период 1998–2000 гг.

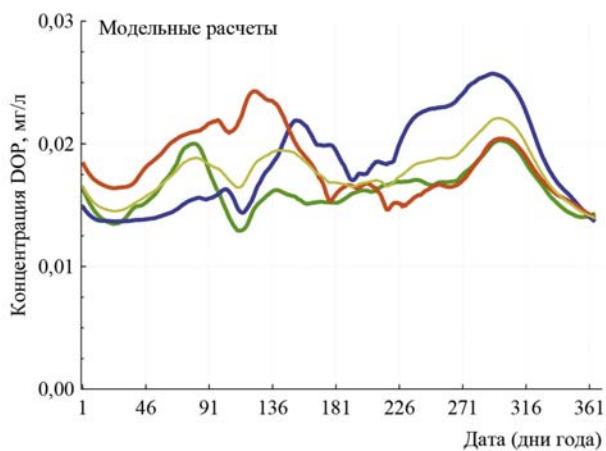
По данным наблюдений, насыщенность всего столба воды кислородом почти всегда близка к 100 %, что создает благоприятные условия для развития гидробионтов. По этому показателю воды залива можно характеризовать как очень чистые [Александров, 2010]. Данные моделирования качественно и количественно в высокой степени соответствуют имеющимся данным наблюдений [Александров, 2010; Witek et al., 2010]. Наблюдаются сезонные изменения содержания кислорода в воде: весенний максимум в период интенсивного фотосинтеза при низких температурах (до 15–16 мг/л) и летнее уменьшение до 8–10 мг/л из-за прогрева вод. В период максимального фотосинтеза (август) (см. рис. 2) содержание растворенного в воде кислорода во всем слое воды достигает 11 мг/л.



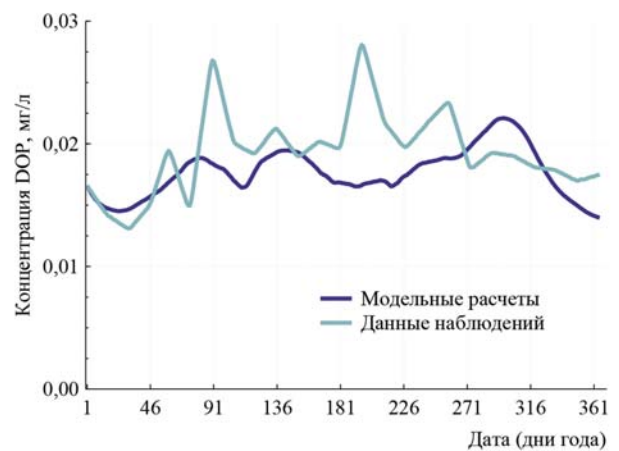
а



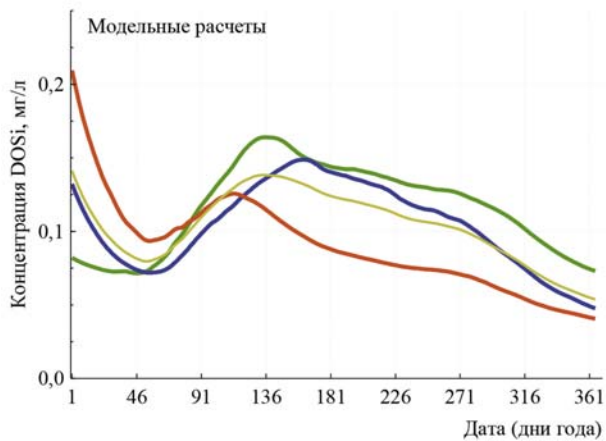
б



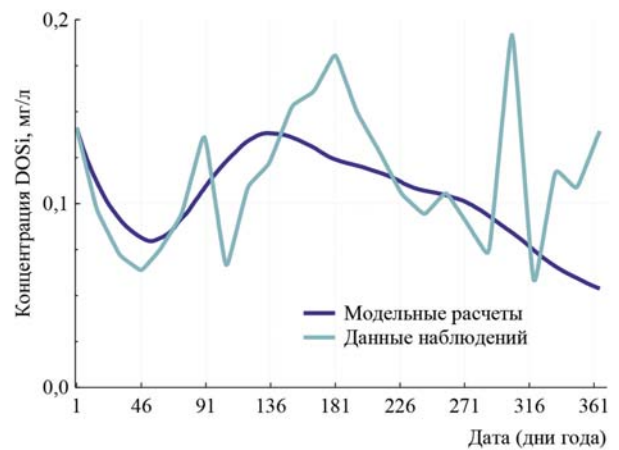
в



г



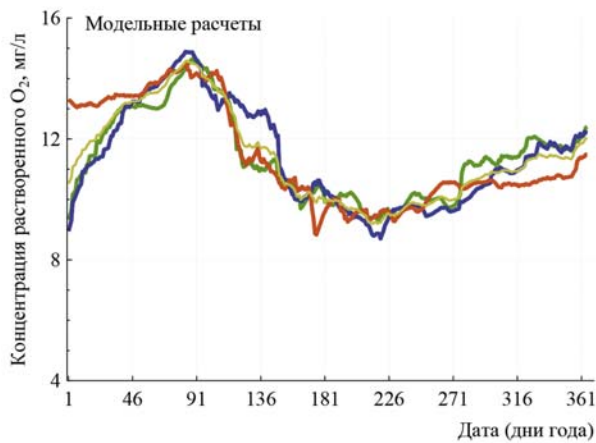
д



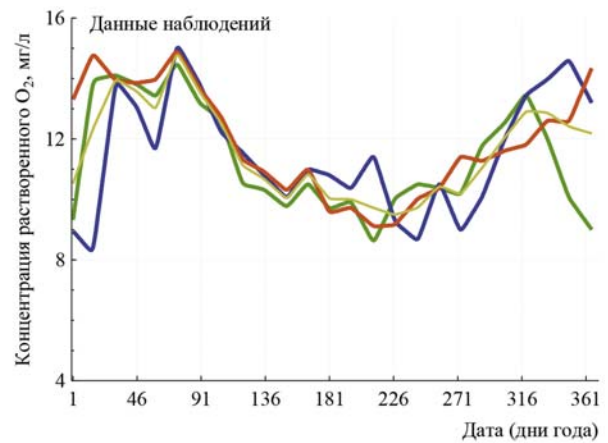
е

Рис. 4. Внутригодовая динамика содержания DON, DOP, DOSi в водной среде по данным моделирования и наблюдений за период 1998–2000 гг.: а, в, д – данные моделирования; б, г, е – сравнение среднеемноголетних значений DON, DOP, DOSi в водной среде по данным наблюдений и моделирования

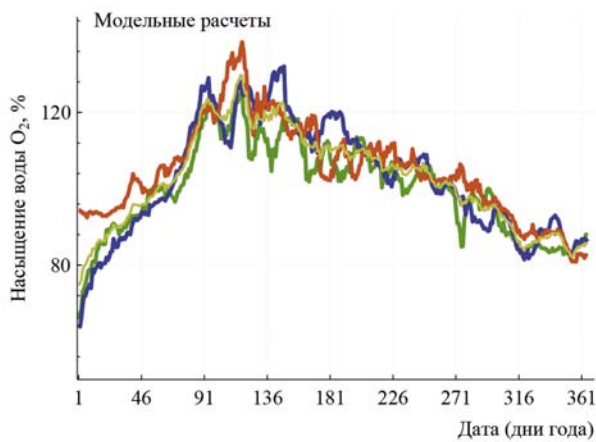
Fig. 4. Intra-annual dynamics of the content of DON, DOP, DOSi in the aquatic environment according to the modeling and observational data for the period 1998–2000: а, в, д – modeling data; б, г, е – comparison of the long-term average values of DON, DOP, DOSi in the aquatic environment according to the observational and modeling data



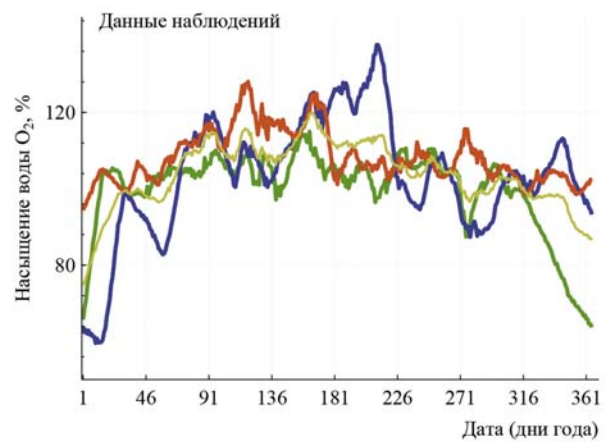
а



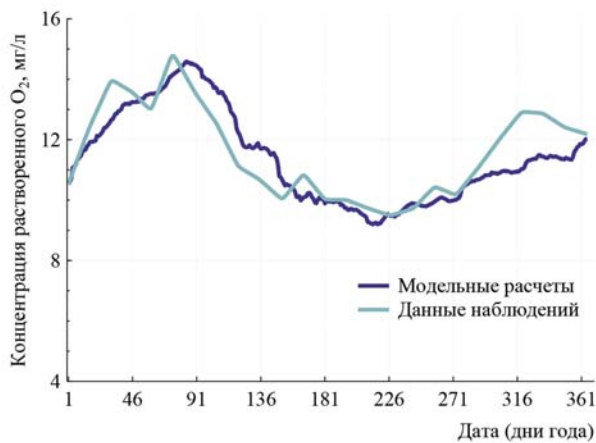
б



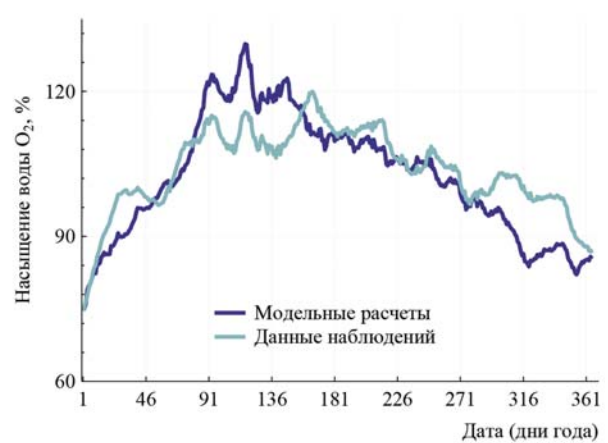
в



г



д



е

Рис. 5. Внутригодовая динамика концентрации растворенного в водной среде кислорода и его процентного содержания: а, в – данные моделирования за период 1998–2000 гг.; б, г – данные наблюдений за период 1998–2000 гг.; д – сравнение среднемноголетних значений растворенного в водной среде кислорода по данным наблюдений и моделирования; е – сравнение среднемноголетних значений процентного содержания кислорода в водной среде по данным наблюдений и моделирования

Fig. 5. Intra-annual dynamics of the oxygen concentration dissolved in the aquatic environment and its percentage: а, в – modeling data for the period 1998–2000; б, г – observational data for the period 1998–2000; д – comparison of the mean long-term values of oxygen dissolved in the aquatic environment according to the observational and modeling data; е – comparison of the long-term average values for the percentage of oxygen in the aquatic environment according to the observational and modeling data

Внутригодовая динамика взвешенного вещества в водной среде и доли минеральной составляющей взвешенного вещества

Отличительной особенностью ВЗ является повышенное содержание в его водной толще осадочного взвешенного материала (водной взвеси, ВВ), широкий диапазон колебаний концентраций и крайне неравномерное ее пространственное распределение по акватории залива. По имеющимся оценкам, концентрация взвеси в бассейне ВЗ составляет в среднем 30,7 мг/л [Чечко, 2002]. Это примерно в 10 раз превышает среднее содержание взвеси в Балтийском море.

Предварительные модельные расчеты показали, что без количественной оценки содержания сестона невозможно адекватно воспроизвести известную из наблюдений временную динамику глубины видимости белого диска (прозрачности воды). Следовательно, при недочете сестона также и расчет коэффициента экстинкции коротковолновой солнечной радиации будет качественно и количественно невер-

ным. Сестон – совокупность взвешенных в воде минеральных и органических частиц. Основу взвешенного органического вещества составляет детрит аллохтонного и автохтонного происхождения. В среднем для российской части ВЗ доли биогенных и минеральных (в основном терригенных) частиц составляют соответственно 54,3 и 45,7 % общего содержания взвеси [Чечко, 2002].

На рис. 6 показана сезонная динамика содержания ВВ в водной среде и доли минеральной составляющей взвешенного вещества в воде ВЗ по данным моделирования. Видно, что максимум содержания ВВ в водах залива приходится на май–июль, когда концентрация его достигает 30–45 мг/л. В этот период происходит снижение (< 35–30 %) доли минеральной составляющей в общем количестве ВВ, что в первую очередь связано с весенне-летним развитием живого вещества планктона. Полученные модельные оценки хорошо согласуются с результатами имеющихся натурных наблюдений. По этим данным, в весенне-летний сезон среднее содержание ВВ в заливе составляет 30,5 мг/л [Чечко, 2002].

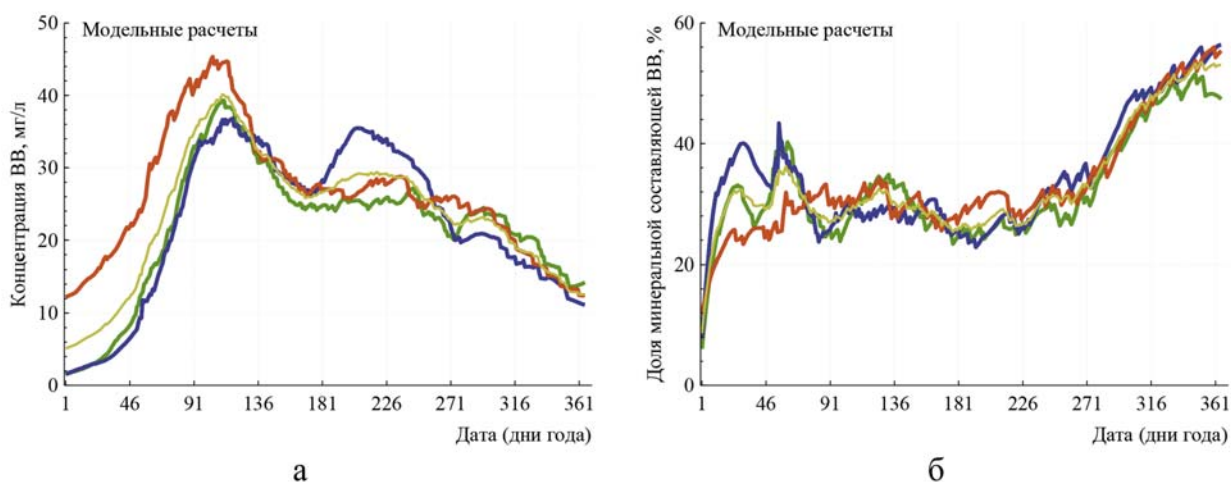


Рис. 6. Внутригодовая динамика содержания взвешенного вещества в водной среде (а) и доли минеральной составляющей взвешенного вещества (б) по данным моделирования

Fig. 6. Intra-annual dynamics of the suspended matter content in the aquatic environment (a) and the proportion of the mineral component of suspended matter (b) according to the modeling data

Содержание и состав ВВ в осенний период контролируется в основном процессами ветрового взмучивания верхнего слоя ДО. В это время (с конца августа – начала сентября) начинается период усиления ветров над акваторией ВЗ. С сентября имеет место постепенное неуклонное снижение концентрации ВВ.

По модельным расчетам, среднее за период 1998–2000 гг. содержание ВВ в течение сентября–декабря меняется в диапазоне 12–23 мг/л. По данным наблюдений, проведенных в 1992–1999 гг., среднее содержание ВВ в водах залива осенью составляет 23,2 мг/л [Чечко, 2002]. На фоне общего осеннего снижения

содержания ВВ могут иметь место кратковременные повышения концентрации ВВ, которые связаны с усилением штормовой активности над акваторией залива. Образующееся в результате взмучивания облако ВВ состоит в основном из терригенного материала. Доля минеральной составляющей ВВ в осенне-зимний период повышается до 50–60 %.

Модельные расчеты внутригодовой динамики взвешенного вещества в водной среде и доли минеральной составляющей взвешенного вещества важны также и для дополнительной оценки адекватности модели. Данные натурных наблюдений содержания ВВ в воде ВЗ не использовали в процессе параметрической настройки модели. Поэтому качественное и количественное соответствие данных моделирования и наблюдений содержания ВВ, а также соотношения минеральной и биогенной составляющих ВВ

служит дополнительным подтверждением способности модели правильно описывать процессы функционирования экосистемы ВЗ.

Оценка значений времени оборота биогенных веществ в экосистеме ВЗ

Количественная оценка значений времени оборота позволяет оценить интенсивность круговорота биогенных веществ в экосистеме залива на каждые сутки модельного времени. Для рассмотренного периода 1998–2000 гг. по особенностям внутригодовой динамики значений времени оборота для всех модельных переменных можно выделить три характерных временных промежутка: 1–120, 121–273, 274–365 сут. Наиболее интенсивно все биогидрохимические процессы трансформации протекают на втором временном промежутке (рис. 7).

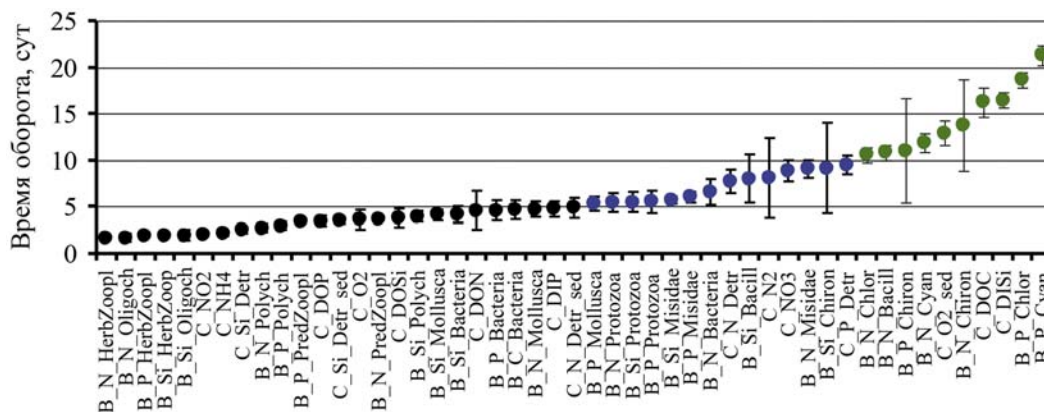


Рис. 7. Значения времени оборота компонентов модели на промежутке 121–273 сут

Fig. 7. Values of the turnover time for the model components in the interval of 121–273 days

Моделирование показало, что в водной среде среднее время оборота NH_4^+ и NO_2^- , а также кремния в составе детрита на первом временном промежутке составило 2–5 сут, на втором – 2–3 сут и 3–5 сут на третьем; растворенного кислорода – около 6, 3,5 и 6 сут; DIP и DISi – около 9 и 16, 7 и 17, 12 и 18 сут; DOC, DON, DOP и DOSi – 16–23, 12–14, 3,5–4,5, 8–10 сут; NO_3^- – около 13, 9 и 13 сут; азота и фосфора в составе детрита – около 10 и 12, 8 и 10, 12 и 15 сут. Время оборота соединений биогенных элементов в верхнем слое ДО существенно выше (в среднем на один-два порядка).

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали, что в подавляющем числе случаев (> 90 %) имеются достоверные межго-

довые различия значений времени оборота модельных переменных на всех выделенных временных интервалах.

Модельная оценка отдельных составляющих годового баланса для соединений биогенных элементов

Модельные расчеты потоков веществ позволяют вычислить балансы и оценить вклад тех или иных компонентов модели и процессов с течением времени и суммарно за год. В частности, получено, что в годовом балансе для всего залива трансформация NH_4^+ в NO_2^- составляет около 6275 т; потребление NH_4^+ фитопланктоном – 1140 т; суммарная экскреция NH_4^+ планктонными организмами

и макрофитами – 2652 т, а бентосом – 2026 т. Внешний приток NH_4^+ в залив составляет около 3367 т, а вынос в море – 1258 т. Поступление NH_4^+ в результате ресуспензии ДО составляет 393 т. В результате процесса биотурбации ДО бентосными организмами в водную толщу за год поступает около 3,1 т NH_4^+ . В годовом балансе NO_3^- трансформация NO_2^- в NO_3^- составляет 5251 т; потребление NO_3^- фитопланктоном – 3945 т; трансформация NO_3^- в N_2 – 1447 т. Внешний приток NO_3^- в залив составляет около 6124 т, а вынос в море – 6730 т. Поступление NO_3^- в результате ресуспензии ДО составляет 145 т, а в результате биотурбации ДО бентосными организмами – 237 т.

В структуре годового баланса DIP трансформация DOP в DIP составляет около 15 т; потребление DIP гетеротрофным бактериопланктоном – 36 т, фитопланктоном – 1346 т, макрофитами – 295 т; экскреция DIP бактериями составила 329 т, фитопланктоном – 559 т, простейшими – 152 т, зоопланктоном – 177 т, ма-

крофитами – 108 т, бентосными организмами – 220 т. Внешний приток DIP в залив составляет около 610 т, а вынос в море – 483 т.

Соответствующие расчеты балансов DOC, DON, DOP, DOSi, азота, фосфора и кремния в составе детрита позволили сделать вывод о существенной роли гетеротрофного бактериопланктона и простейших организмов в процессах трансформации соединений биогенных элементов в экосистеме ВЗ (рис. 8 и 9). На рис. 8 в качестве примера показаны изменения во времени составляющих баланса DON, DOP, DOSi и процентного вклада этих составляющих, а на рис. 9 – составляющих баланса азота в составе детрита (N_Detr) и их процентного вклада.

Данные рис. 8 показывают, что наиболее существенное потребление DON, DOP, DOSi гетеротрофными бактериями и простейшими имеет место с мая по сентябрь (промежуток 121–273 сут). В этот период их совместный вклад в балансе растворенных органических веществ может составлять 20–40 %.

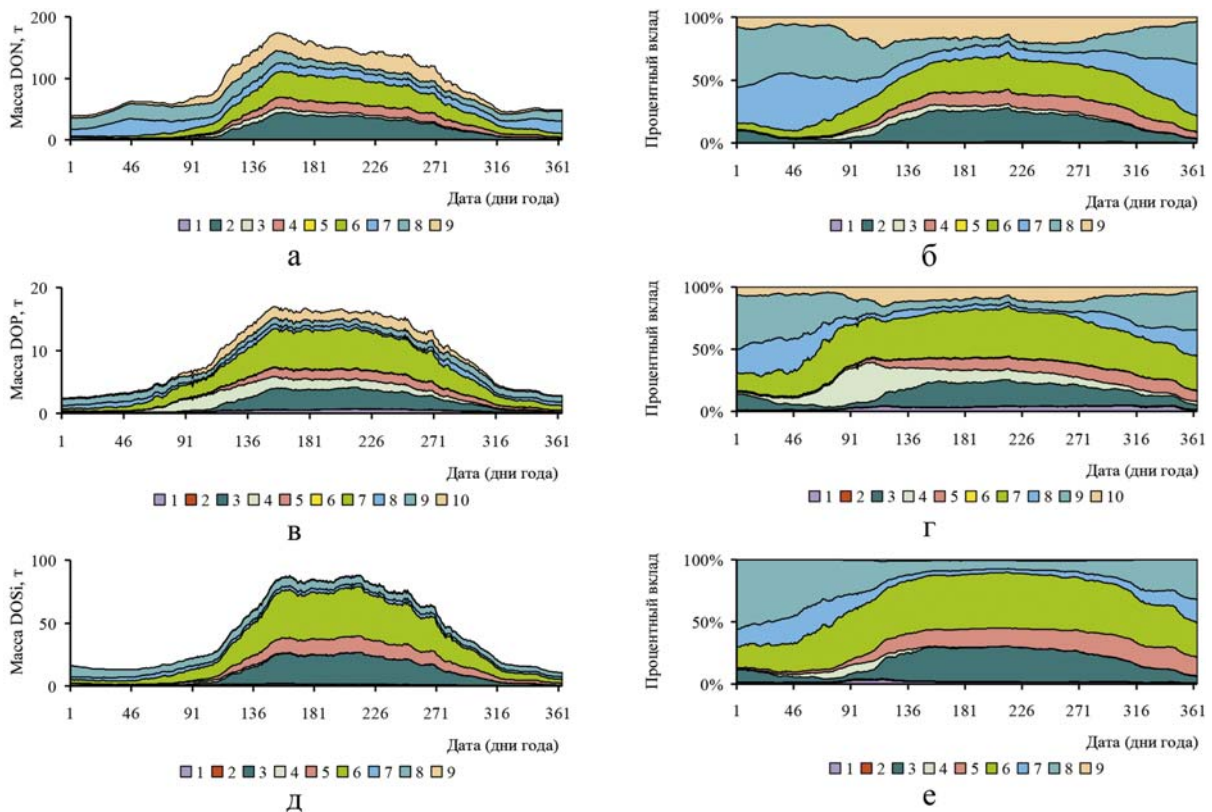


Рис. 8. Изменения во времени отдельных составляющих баланса DON, DOP, DOSi и процентного вклада этих составляющих. Потреблению DON гетеротрофными бактериями и простейшими на фрагментах (а) и (б) соответствуют составляющие баланса с номерами 2 и 4; потреблению DOP на фрагментах (в) и (г) и DOSi на фрагментах (д) и (е) – составляющие баланса с номерами 3 и 5

Fig. 8. Changes in time of individual components of the balance DON, DOP, DOSi and the percentage contribution of these components. Consumption of DON by heterotrophic bacteria and protozoa in fig. (a) and (б) corresponds to balance components no. 2 and 4; consumption of DOP in fig. (в) and (г) and DOSi in figs. (д) and (е) – to balance components no. 3 and 5

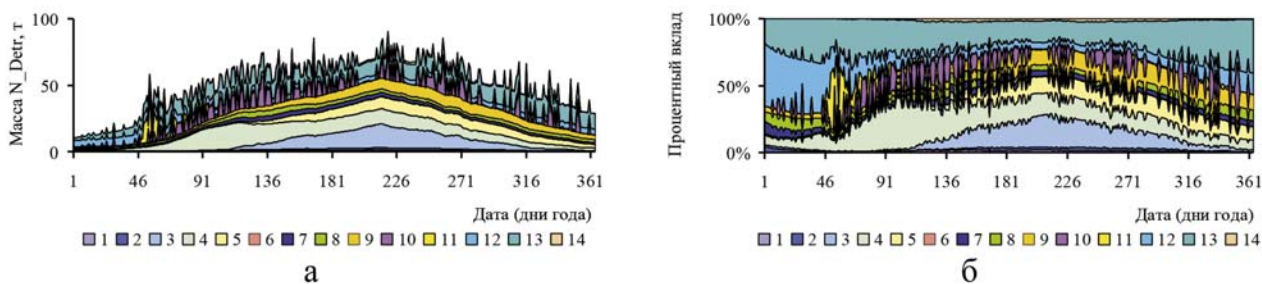


Рис. 9. Изменения во времени отдельных составляющих баланса азота в составе детрита и процентного вклада этих составляющих. Потреблению N_Detr гетеротрофными бактериями на обоих фрагментах соответствует составляющая баланса с номером 3; отмиранию простейших и образованию детрита – составляющая баланса с номером 5; седиментации и поступлению N_Detr в воду в результате ресуспензии верхнего слоя ДО – составляющие баланса с номерами 10 и 11 соответственно

Fig. 9. Changes in time of individual components of the nitrogen balance in the detritus and the percentage contribution of these components. Consumption of N_Detr by heterotrophic bacteria in fig. (a) and (б) corresponds to balance component no. 3; death of protozoa and the formation of detritus – balance component no. 5; sedimentation and the release of N_Detr into the water as a result of resuspension of the upper layer of bottom sediments – balance components no. 10 and 11, respectively

Данные рис. 9 показывают, что наиболее существенное потребление N_Detr гетеротрофными бактериями и образование детрита в результате отмирания простейших организмов имеет место с мая по сентябрь. Кроме того, моделирование позволяет сделать важный вывод о том, что процессы седиментации детрита и поступления N_Detr в воду в результате ресуспензии верхнего слоя ДО в значительной степени зависят от конкретных ветровых условий над акваторией ВЗ, гидродинамических условий в водной толще и интенсивности воздействия течений и волнения на ДО. При ветрах со скоростью > 4–5 м/с процессы седиментации взвесей постепенно замедляются вплоть до полной их остановки. Наиболее часто это происходит в осенне-зимние месяцы. Поэтому в эти периоды процесс седиментации становится более «дискретным» по сравнению с летними месяцами. Вместе с тем одновременно с усилением ветровой нагрузки при ветрах со скоростью > 5 м/с (особенно при ветрах западного направления) усиливается интенсивность процессов ресуспензии верхнего слоя ДО и поступления соединений биогенных элементов в водную толщу.

Заключение

Разработанная имитационная модель экосистемы ВЗ Балтийского моря показала свою эффективность и обладает важными преимуществами по сравнению с другими имеющимися разработками (например, с моделью Delft 3D WAQ [Delft..., 2005; Wittek et al., 2010]). Данная модель и все ее базовые блоки разработаны системно, объединены общей задачей и целью. Их

структура сформирована с учетом всестороннего анализа и синтеза имеющихся данных многолетних гидрологических, гидрохимических и гидробиологических наблюдений, сведений об источниках биогенных веществ, основных путях их трансформации. Модель позволяет исследовать наиболее важные особенности внутри- и межгодовой динамики и изменчивости состояния экосистемы ВЗ, закономерности процессов биогидротрансформации и круговорота важнейших соединений биогенных элементов (углерода, азота, фосфора, кремния) и динамики растворенного в воде кислорода.

Модельные расчеты показали, что по всем переменным имитационной модели получено достаточно хорошее качественное и количественное соответствие результатов моделирования данным непосредственных наблюдений. Во-первых, это является свидетельством правильного выбора структуры модели, в которой использована адекватная математическая формализация и системное описание взаимосвязанных биогидрохимических процессов. Во-вторых, это говорит о том, что в достаточно полной мере осуществлен синтез имеющихся гидробиологических, гидрохимических и гидрофизических знаний о наиболее важных процессах, которые протекают в экосистеме залива, а также о наиболее важных источниках поступления и стока биогенных веществ в экосистеме. В-третьих, успешная реализация параметризации биогидрохимических процессов и настройки модели показала, что предлагаемые алгоритмы поиска параметров для биогидрохимического блока имитационной модели позволяют успешно решать оптимизационную задачу даже в условиях

недостаточного объема данных наблюдений и сравнительно высокой их дисперсии.

Имеющийся опыт разработки и применения имитационных моделей позволит предположить, что в таких моделях существуют группы ведущих параметров, от изменения значений которых чувствительность модели зависит наиболее сильно. Формирование же набора ведущих параметров во многом зависит от структуры самой модели. Эта проблема является одной из самых непростых методических проблем моделирования. Ее решение требует дополнительных исследований.

Полученные в данной работе результаты показали, что необходимо обратить внимание на статистически достоверные межгодовые отличия значений эмпирических параметров модели. Поэтому следует с большой осторожностью использовать одни и те же значения модельных параметров при проведении вычислительных экспериментов для разных лет наблюдений. По всей видимости, такая ситуация является типичной для моделирования. Межгодовые различия параметров могут быть обусловлены существенной межгодовой изменчивостью метеорологических, гидрологических условий, которые оказывают воздействие на функционирование экосистемы, изменениями внешней биогенной нагрузки и, как следствие, существенным изменением сложной и взаимосвязанной совокупности внутриводоемных процессов, изменением их скоростей, времени оборота и перераспределением потоков веществ. Существование статистически достоверных межгодовых отличий значений параметров модели создает непростую проблему на пути разработки прогнозов будущего развития экосистемы ВЗ при изменении внешних условий (например, климатических изменений, антропогенных воздействий).

Расчеты балансов растворенных органических веществ (DOC, DON, DOP, DOSi), а также азота, фосфора и кремния в составе детрита позволяют сделать важный вывод о существенной роли гетеротрофного бактериопланктона и простейших организмов в процессах трансформации соединений биогенных элементов в экосистеме ВЗ. К сожалению, имеющиеся мониторинговые наблюдения не охватывают эти важнейшие уровни функционирования экосистемы залива. Модельные расчеты можно рассматривать в качестве первых ориентировочных количественных оценок участия бактериопланктона и простейших в трансформации веществ в ВЗ.

В процессе разработки имитационной модели ВЗ и подготовки исходных данных для нее были использованы только литературные

данные за ограниченный ряд лет. Этим данным вполне достаточно для отладки и настройки модели, подбора значений ряда эмпирических параметров, проведения серии тестовых расчетов. Однако для решения всего комплекса первостепенных и важных для практики задач (в том числе и задач прогноза будущих изменений качества воды ВЗ и уровня его биологической продуктивности) необходимо привлечение и использование данных актуальных мониторинговых наблюдений, которые проводятся в Атлантическом филиале ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО») на постоянной основе.

Литература

Александров С. В. Первичная продукция планктона в лагунных экосистемах Балтийского моря (Вислинский и Куршский заливы). Калининград: АтлантНИРО, 2010. 228 с.

Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. М.: Мир, 2003. 686 с.

Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Н. Н. Лазаренко, А. В. Маевского. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 279 с.

Ежова Е. Е., Рудинская Л. В., Павленко-Лятун М. В. Вислинский залив. Макрозообентос // Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа / Под ред. А. Ф. Алимова, М. Б. Ивановой. М.: Научный мир, 2004. С. 146–164.

Кейда М. Э. Вислинский залив. Ихтиоценоз // Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа / Под ред. А. Ф. Алимова, М. Б. Ивановой. М.: Научный мир, 2004. С. 168–172.

Науменко Е. Н. Зоопланктон Вислинского залива. Калининград: КГТУ, 2007. 169 с.

Подгорный К. А. Расчет параметров термодинамического взаимодействия, характеристик теплового баланса и температуры воды в нестратифицированных водоемах. Ярославль: ЯГТУ, 2000. 100 с.

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

Подгорный К. А. Математическая модель для изучения экосистемы Вислинского залива Балтийского моря. Часть 1. Теоретические основы и структура модели, методология подготовки исходных данных для выполнения расчетов. Калининград: АтлантНИРО, 2018. 271 с.

Чечко В. А. Анализ пространственно-временной изменчивости взвешенного вещества Калининградского залива Балтийского моря // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 4. С. 425–432.

Chubarenko B. V., Lund-Hansen L. Ch., Beloshitskii A. Comparative analysis of potential wind-wave impact on bottom sediments in the Vistula and Curonian lagoon // The Baltica: an international yearbook on geology, geomorphology and palaeogeography of the Baltic sea. 2002. Vol. 15. P. 30–39.

Chubarenko B. V., Margoński P. The Vistula lagoon // Ecology of Baltic Coastal Waters / Ed. U. Schiewer. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 167–195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8

Delft 3D WAQ, v. 2.02: detailed description of processes. Technical reference manual. Delft, the Netherlands: Delft Hydraulics, 2005. 386 p.

Nelder J. A., Mead R. A simplex method for function minimization // Comp. J. 1965. Vol. 7. P. 308–313.

Podgorny K. A., Leonov A. V. Review of the current methods used to assess the values of coefficients, sensitivity, and adequacy of simulation models of Aquatic Ecosystems // Water Resources. 2015. Vol. 42, no. 4. P. 477–499. doi: 10.1134/S0097807815040119

Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam: North-Holland, 1971. 474 p.

Transboundary waters and basins in the South-East Baltic / Ed. B. V. Chubarenko. Kaliningrad: Terra Baltica, 2008. 306 p.

Witek Z., Zalewski M., Wielgat-Rychert M. Nutrient stocks and fluxes in the Vistula lagoon at the end of the twentieth century. Slupsk-Gdynia, 2010. 186 p.

References

Aleksandrov S. V. Primary production of phytoplankton in the Curonian lagoon and Vistula lagoon of the Baltic Sea. Kaliningrad: AtlantNIRO; 2010. 228 p. (In Russ.)

Brandt Z. Data analysis. Statistical and computational methods for scientists and engineers. Moscow: Mir; 2003. 686 p. (In Russ.)

Chechko V. A. Analysis of spatiotemporal variability of suspended matter in the Kaliningrad Bay of the Baltic Sea. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2002;29(4):425–432. (In Russ.)

Ezhova E. E., Rudinskaya L. V., Pavlenko-Lyatun M. V. Vistula lagoon. Macrozoobenthos. *Zakonomernosti gidrobiologicheskogo rezhima vodoemov raznogo tipa = Patterns of the hydrobiological regime of water bodies of various types*. Moscow: Nauchnyi mir; 2004. P. 146–164. (In Russ.)

Keida M. E. Vistula lagoon. Ichthyocenosis. *Zakonomernosti gidrobiologicheskogo rezhima vodoemov raznogo tipa = Patterns of the hydrobiological regime of water bodies of various types*. Moscow: Nauchnyi mir; 2004. P. 168–172. (In Russ.)

Lazarenko N., Maevsky A. (eds.) Hydrometeorological regime of the Vistula lagoon. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1971. 279 p. (In Russ.)

Naumenko E. N. Zooplankton of the Vistula lagoon. Kaliningrad: KGTU; 2007. 169 p. (In Russ.)

Podgorny K. A. Calculation of parameters of thermohydrodynamic interaction, characteristics of heat balance and water temperature in non-stratified water bodies. Yaroslavl: YGTU; 2000. 100 p. (In Russ.)

Podgorny K. A. Mathematical modeling of freshwater ecosystems in non-stratified water bodies: algorithms and numerical methods. Rybinsk: Rybinskii dom pechati; 2003. 328 p. (In Russ.)

Podgorny K. A. Mathematical model for studying the ecosystem of the Vistula lagoon of the Baltic Sea. Part 1. Theoretical foundations and structure of the model, methodology for preparing initial data for performing calculations. Kaliningrad: AtlantNIRO; 2018. 271 p. (In Russ.)

Chubarenko B. V., Lund-Hansen L. Ch., Beloshitskii A. Comparative analysis of potential wind-wave impact on bottom sediments in the Vistula and Curonian lagoon. *The Baltica: an international yearbook on geology, geomorphology and palaeogeography of the Baltic sea*. 2002;15:30–39.

Chubarenko B. V., Margoński P. The Vistula lagoon. *Ecology of Baltic coastal waters*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2008. P. 167–195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8

Delft 3D WAQ, v. 2.02: detailed description of processes. Technical reference manual. Delft, the Netherlands: Delft Hydraulics; 2005. 386 p.

Nelder J. A., Mead R. A simplex method for function minimization. *Comp. J.* 1965;7:308–313.

Podgorny K. A., Leonov A. V. Review of the current methods used to assess the values of coefficients, sensitivity, and adequacy of simulation models of Aquatic Ecosystems. *Water Resources*. 2015;42(4):477–499. doi: 10.1134/S0097807815040119

Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam: North-Holland; 1971. 474 p.

Chubarenko B. V. (ed.). Transboundary waters and basins in the South-East Baltic. Kaliningrad: Terra Baltica; 2008. 306 p.

Witek Z., Zalewski M., Wielgat-Rychert M. Nutrient stocks and fluxes in the Vistula lagoon at the end of the twentieth century. Slupsk-Gdynia; 2010. 186 p.

Поступила в редакцию / received: 28.05.2022; принята к публикации / accepted: 02.06.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Подгорный Константин Алексеевич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории лиманов Балтийского моря

e-mail: kapborok@mail.ru

Дмитриева Ольга Александровна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории гидробиологии «АтлантНИРО», научный сотрудник лаборатории морской экологии АО ИО РАН

e-mail: phytob@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Podgorny, Konstantin

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory for Baltic Sea Lagoons

Dmitrieva, Olga

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Hydrobiology Laboratory, VNIRO Atlantic Branch; Researcher, Laboratory for Marine Ecology, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology RAS

УДК 556.01 : 556.51 : 556.55 : 519.87 (282.247.211)

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ОЗЕРО – ВОДОСБОР» КАК МЕТОДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИНСТРУМЕНТА ОБОСНОВАНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА)

**Н. Н. Филатов^{1*}, В. Н. Баклагин¹, А. В. Исаев^{1,2},
С. А. Кондратьев^{1,3}, О. П. Савчук¹**

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
* nfilatov@rambler.ru

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Санкт-Петербургский филиал
(1-я линия В. О., 30, Санкт-Петербург, Россия, 119053)

³ Институт озероведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург,
Россия, 196105)

Разрабатывается информационно-аналитическая система (ИАС), предназначенная для оценки состояния и прогнозирования динамики системы «озеро – водосбор». Прогнозирование состояния экосистемы озера в условиях глобальных изменений климата и активной эксплуатации его ресурсов (водных, биологических, энергетических, рекреационных, транспортных) осуществляется на трехмерной математической модели экосистемы озера, сопряженной с моделью стока с водосбора. Модели озера и водосбора объединяются с базой данных и знаний в единой ИАС. Выполненные с помощью ИАС прогностические оценки сезонной и многолетней динамики экосистемы озера будут служить основой для выявления возможных экономических, социальных и культурных последствий региональных и глобальных изменений. Функционирующая ИАС необходима для создания системы поддержки принятия управленческих решений.

Ключевые слова: Онежское озеро; информационно-аналитическая система; экосистемное моделирование; система «озеро – водосбор»; управление водными ресурсами; климатические и антропогенные сценарии

Для цитирования: Филатов Н. Н., Баклагин В. Н., Исаев А. В., Кондратьев С. А., Савчук О. П. Разработка информационно-аналитической системы «озеро – водосбор» как метода фундаментальных исследований и инструмента обоснования управленческих решений (на примере Онежского озера) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 161–172. doi: 10.17076/lim1683

Финансирование. Работа выполнена по гранту РНФ № 22-17-00193.

**N. N. Filatov^{1*}, V. N. Baklagin¹, A. V. Isaev^{1,2}, S. A. Kondratyev^{1,3}, O. P. Savchuk¹.
DEVELOPING A «LAKE – CATCHMENT» INFORMATION ANALYSIS SYSTEM
AS A METHOD FOR BASIC RESEARCH AND A TOOL FOR DECISION-MAKING
(LAKE ONEGO CASE STUDY)**

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *nfilatov@rambler.ru

² St. Petersburg Branch of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (30 1st Liniia V.O., 119053 St. Petersburg, Russia)

³ Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanov St., 196105 St. Petersburg, Russia)

An information analysis system (IAS) is being developed to assess the state and predict the dynamics of a lake-catchment system. Forecasting of the state of the lake ecosystem in the context of global climate change and active exploitation of its resources (water, energy, recreational and biological resources, transport) is done using a three-dimensional mathematical model of the lake ecosystem, coupled with a model of runoff from the catchment. Lake and catchment models are combined with a database and a knowledge base to form a single IAS. The prognostic assessments of the seasonal and long-term dynamics of the lake ecosystem performed using the IAS serve as the basis for identifying the possible economic, social and cultural consequences of regional and global changes. Operational IAS is necessary to create a management decision support system.

Keywords: Lake Onego; information analysis system; ecosystem modeling; lake-catchment system; water management; climate and anthropogenic scenarios

For citation: Filatov N. N., Baklagin V. N., Isaev A. V., Kondratyev S. A., Savchuk O. P. Developing a "lake-catchment" information analysis system as a method for basic research and a tool for decision-making (Lake Onego case study). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 161–172. doi: 10.17076/lim1683

Funding. The study was supported by Russian Science Foundation grant #22-17-00193.

Введение

Несмотря на предпринятые в последние четыре десятилетия практические меры по охране и восстановлению экосистем крупных¹ озер мира, до сих пор состояние этих озер не только существенно не улучшается, но отмечается деградация их экосистем, являющаяся результатом кумулятивных воздействий антропогенных и природных факторов в долгосрочном масштабе времени [Jenny et al., 2020]². В этом же обзоре предсказывается возможное продолжение деградации озер из-за увеличения населения Земли и потепления климата, поэтому требуется незамедлительно уделить существенно большее, чем сейчас, внимание решению проблем управления и охраны ресурсов экосистем крупных озер,

развитию сети наблюдений, мониторинга, совершенствованию законодательства в области охраны водных ресурсов. Не вызывает сомнения необходимость интенсификации подобных исследований и в России с конечной целью создания интегрированных систем управления, обеспечивающих информационную поддержку органов, принимающих практические решения [Данилов-Данильян, Хранович, 2010; Меншуткин и др., 2014а; Диагноз..., 2020]. Из-за отсутствия таких систем или недостаточной их работанности управленческие решения в РФ по использованию ресурсов, сохранению или восстановлению озер и их экосистем зачастую принимаются без соответствующего научного обоснования, как это было сделано, например, для озера Байкал [Никитин и др., 2019].

В целом для крупнейших озер России отсутствует количественное описание сложных экосистемных взаимодействий, которое позволило бы не только достоверно различать естественные климатические и антропогенные социо-экономические причины изменений, но и прогнозировать возможную динамику экосистем с указанием степени неопреде-

¹ В этом обзоре под крупными понимаются озера с площадью более 100 км².

² Отметим, что среди 40 авторов обзора нет ни одного эксперта из России и даже не упоминаются такие крупные озера Евразии, как Байкал, Ладожское, Онежское, Каспий, Балхаш.

ленности прогнозов. В число таких прогнозов могут входить, например, прогноз изменений гидрологического режима, трофического статуса и рыбопромысловой деятельности, а также проверка эффективности и обоснование локализации гидротехнических сооружений. Для оценки непосредственного краткосрочного воздействия и отдаленных последствий этих и других форм природопользования, модифицированных процессами на водосборе и климатическими изменениями, необходимы как фундаментальные знания экосистемы, так и способность их количественного применения. При этом ни полевые экспериментальные исследования, ни мониторинг не позволяют в полной мере оценить указанные выше системные взаимодействия и дать надежные прогностические оценки [Исаев, Савчук, 2020; Диагноз..., 2020; Румянцев и др., 2021].

Системообразующим ядром современных систем управления ресурсами крупных озер должны служить математические модели, которые позволяют прогнозировать состояние водной экосистемы в условиях глобальных изменений климата и активной эксплуатации ресурсов (водных, биологических, энергетических, рекреационных, транспортных) водоема и его водосбора. Такие прогнозы необходимы и для обоснованной оценки экономических, социаль-

ных и культурных последствий региональных и глобальных изменений. Разработка математических моделей экосистем больших озер продолжается несколько десятилетий [например, Di Toro, Connolly, 1982; Straškraba, Gnauck, 1985; Jorgensen, 1994; Mooij et al., 2010; Scavia et al., 2016]. Однако из недавних обзоров «Моделирование эвтрофикации озерных экосистем» [Vinçon-Leite, Casenave, 2019] и «Моделирование эвтрофикации морей» [Ménèsquen, Lacroix, 2018] видно, что хотя общий уровень разработки моделей термогидродинамики и экосистем для морей опережает таковой для крупных озер, использование моделей обычно сводится к однократным решениям ограниченного круга задач и до сих пор не послужило основой создания надежных постоянно действующих систем управления состоянием и ресурсами озер. Схожая ситуация сложилась и в России, где, несмотря на существенные достижения в области моделирования озер [например, Меншуткин, Воробьева, 1987; Rukhovets, Filatov, 2010; Диагноз..., 2020], разработанные модели так и не были использованы для создания систем поддержки принятия решений.

В обобщенном виде процесс управления водными ресурсами крупных озер может быть представлен следующей схемой (рис. 1) и сопровождаться теоретическими рассуждениями

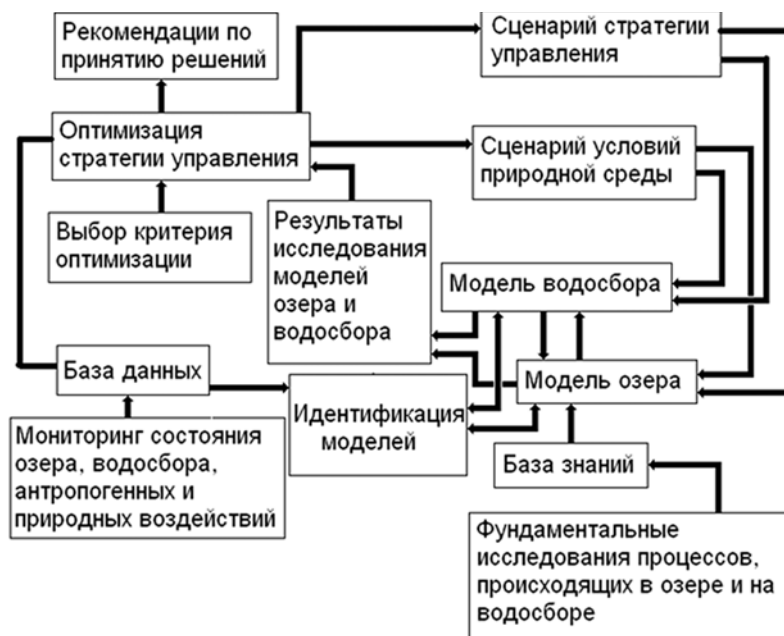


Рис. 1. Схема процесса управления водными ресурсами озера [Меншуткин и др., 2014а]

Fig. 1. Scheme of the lake water management process [Menshutkin et al., 2014a]

о выборе стратегий управления на основе многокритериальной оптимизации, важности использования экономического понятия стоимости, оценки ущерба и штрафных санкций, а также другими правомерными теоретическими построениями. Однако на практике нам неизвестны примеры сколь-нибудь полной реализации подобных схем для конкретных озер России. Не преодолен даже более скромный, но абсолютно необходимый этап создания и обеспечения устойчивого функционирования систем поддержки принятия решений, подобных, например, доступной онлайн системе Baltic NEST [Wulff et al., 2013], которая играет определяющую роль в составлении количественных рекомендаций по противодействию эвтрофикации в рамках межправительственного «Плана действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю» (<https://helcom.fi/baltic-sea-action-plan>).

Исследуя пути управления водными ресурсами крупного озера и наполнения их конкретным содержанием, включая элементы программного обеспечения, мы начинаем с создания информационно-аналитической системы «озеро – водосбор». При всей схожести общих законов функционирования водных экосистем (круговорот вещества, трофические цепи и сети, взаимодействие глубоководных, прибрежных и донных подсистем) проявление этих законов в конкретных крупных озерах существенно различается и модифицируется морфометрией, климатическими условиями, природными и социально-экономическими условиями на водосборе. Поэтому в качестве конкретного водоема, на примере которого предлагается системно исследовать влияние антропогенных и природных факторов на сезонные и многолетние изменения экосистемы, выбрано Онежское озеро, которое, с одной стороны, в среднем олиготрофно и все еще обладает высоким качеством воды, но с другой – начало демонстрировать неблагоприятные тенденции ухудшения состояния своей экосистемы [Крупнейшие..., 2015; Калинин и др., 2018].

Далее остановимся на трех основных блоках создаваемой информационно-аналитической системы Онежского региона, образованного озером с его водосборным бассейном: а) имитационных математических моделях термогидродинамики и биогеохимического круговорота биогенов в экосистеме озера, б) моделях формирования водного стока и биогенной нагрузки на водосборе, в) интегрированной базой данных, знаний и результатов моделирования с инструментами визуализации, представленной в виде, пригодном для совместного анализа.

Имитационная модель экосистемы Онежского озера

Построение, дальнейшее развитие и эксплуатация имитационной модели является формой фундаментального исследования озера [Беляев, 1980] и инструментом широкого спектра прогнозов. Как форма исследования, модель является объединяющей платформой для сопоставления формулировок модели и результатов моделирования со знаниями и данными, полученными в ходе гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических и геохимических исследований, а также проверки и обсуждения их взаимной состоятельности. Созданная и постоянно совершенствующаяся модель используется для решения широкого круга исследовательских, проектных и прогностических задач.

В информационно-аналитической системе базовой является модель биогеохимического круговорота биогенных элементов в экосистеме озера, которая в процессе эксплуатации может модифицироваться и расширяться для решения специфических задач, таких, например, как динамика органических загрязнителей [Undeman et al., 2014], ртути [Soerensen et al., 2016] и микропластика [Berezina et al., 2021]. Расчеты на созданных ранее моделях Онежского озера [Меншуткин и др., 2014б] позволили показать последствия антропогенных воздействий, потепления климата, а также оценить ассимиляционный потенциал и допустимые значения поступления фосфора и азота [Руховец и др., 2011]. Существенным недостатком созданных моделей, который может оказаться критическим при долгосрочном прогнозировании, является то, что в них не учитывалась динамика биогенных элементов в донных отложениях, служащих «памятью» эволюции озерной экосистемы и важнейшим звеном, замыкающим биогеохимический круговорот путем реминерализации биогенов. Этот недостаток мог бы быть устранен совместно с другими наметившимися усовершенствованиями, но поддержка указанных моделей и их дальнейшее развитие стали невозможными по научно-организационным причинам. В разрабатываемой же ИАС используется модель сопряженных круговоротов азота и фосфора [Savchuk, 2002; Savchuk et al., 2012; Isaev et al., 2020], предварительно адаптированная к условиям Ладожского озера [Исаев, Савчук, 2020] и успешно использованная для тридцатилетнего «биогеохимического реанализа» экосистемы Онежского озера [Isaev et al., 2022; Savchuk et al., 2022]. Модель, которую предлагаем назвать Saint-

Petersburg Lake Ecosystem Model (SPLEM), состоит из гидродинамического и биогеохимического модулей.

Гидродинамический модуль экогидродинамической модели Онежского озера основан на модели Массачусетского института технологий MITgcm [Marshall et al., 1997], которая успешно использовалась для моделирования термогидродинамики крупных бореальных озер [Gloege et al., 2020; Исаев, Савчук, 2020].

Блок-схема биогеохимического модуля представлена на рис. 2. Формулировка модели и параметризация процессов взаимодействия представлены во всей полноте в работах [Savchuk, 2002; Isaev et al., 2020]. Состоятельность параметризаций и правдоподобность воспроизводимой динамики экосистемных переменных и потоков биогенных элементов продемонстрированы более чем двадцатилетним опытом моделирования [например, Savchuk, 2002; Savchuk et al., 2012; Isaev et

al., 2020], включая моделирование Онежского озера [Isaev et al., 2022; Savchuk et al., 2022].

Наряду с исследованиями долговременных крупномасштабных проблем климатических и антропогенных воздействий, включая оценки трофического статуса водоема, определения допустимой нагрузки на экосистему, количественное исследование фильтрующе-трансформирующей роли термобара, использование ИАС послужит и решению широкого спектра сугубо прикладных задач: проверки существующей и обоснования проектируемой локализации водозаборов, точечных и диффузионных поступлений, выпусков бытовых и промышленных сточных вод, размещения хозяйств аквакультуры и подготовки рекомендаций по природоохранному режимам побережья. В то же время важнейшими особенностями Онежского озера являются сложная батиметрия, чрезвычайная изрезанность его береговой черты, наличие узких губ и заливов, а также

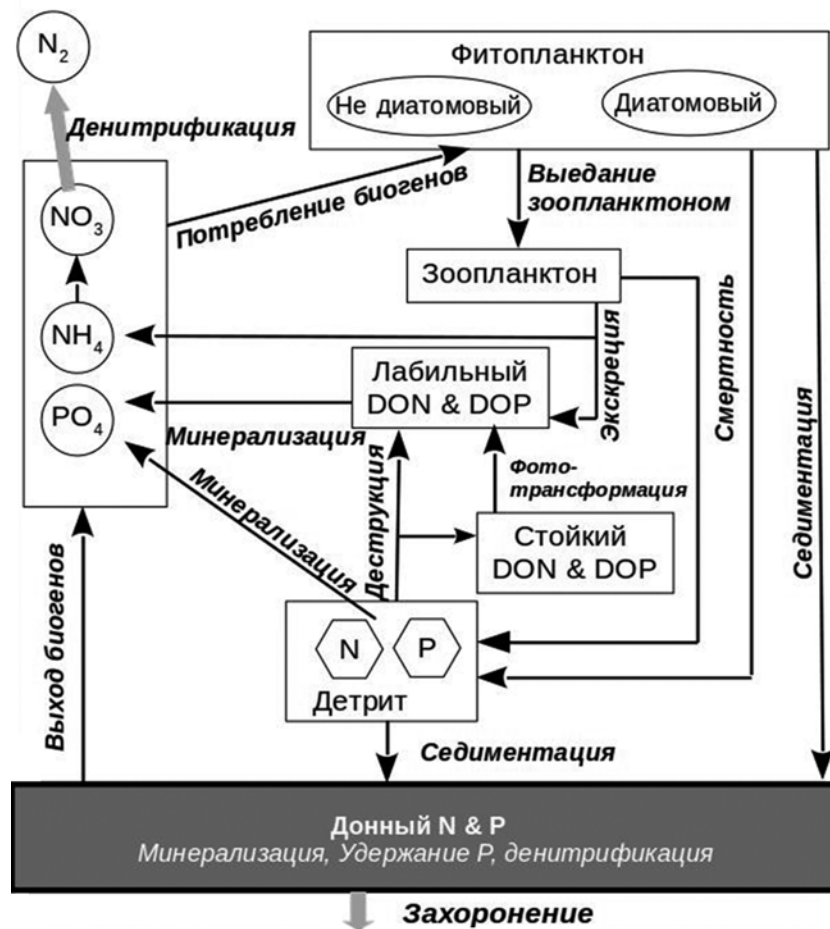


Рис. 2. Биогеохимические переменные и потоки вещества в SPLEM

Fig. 2. Biogeochemical variables and matter fluxes in SPLEM

существенные пространственные градиенты экосистемных характеристик (рис. 3). Из-за этих особенностей решение вышеперечисленных геоинженерных задач невозможно без реалистичного описания комплекса процессов переноса и трансформации вещества в заливах, литоральной зоне, а также водо- и массо-

обмена губ с открытыми водами на основе трехмерной гидродинамической модели. С учетом горизонтальных размеров озера и радиуса деформации Россби, который для Онежского озера составляет 2–3 км, минимально необходимое горизонтальное разрешение сеточной области должно составлять 500–1000 м.

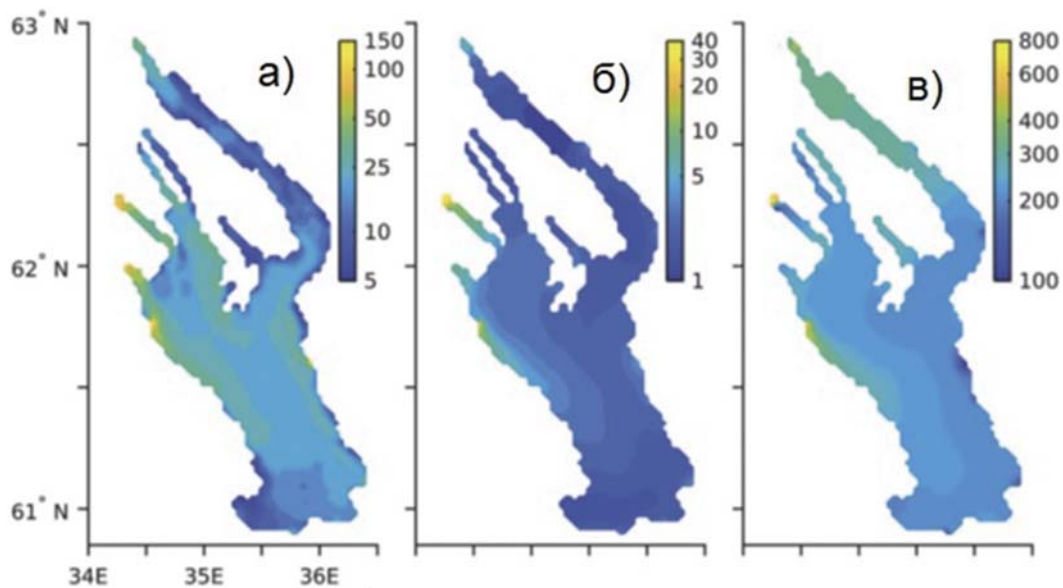


Рис. 3. Полученные в результате биогеохимического реанализа экосистемы Онежского озера и представленные в логарифмическом масштабе средние многолетние (1985–2015 гг.) значения: а) годовой первичной продукции ($\text{г C м}^{-2} \text{ год}^{-1}$), б) зимних (апрель) поверхностных максимумов фосфатов ($\text{мг P} \cdot \text{м}^{-3}$), в) растворенного неорганического азота DIN ($\text{мг N} \cdot \text{м}^{-3}$) [Isaev et al., 2022]

Fig. 3. The average long-term (1985–2015) values obtained as a result of biogeochemical reanalysis of the Lake Onego ecosystem and presented on a logarithmic scale: a) annual primary production ($\text{g C м}^{-2} \text{ yr}^{-1}$), b) winter (April) surface peaks of phosphates ($\text{mg P} \cdot \text{m}^{-3}$), c) dissolved inorganic nitrogen DIN ($\text{mg N} \cdot \text{m}^{-3}$) [Isaev et al., 2022]

Модель формирования водного стока и биогенной нагрузки на водосборе

Водный режим озера и содержание в нем биогенных элементов, определяющие состояние экосистемы озера, в значительной мере складываются под воздействием процессов, протекающих в ходе эволюции водосборного бассейна водоема. Поэтому для диагностирования состояния озера и прогнозирования сезонных и многолетних изменений необходимо использовать динамическую модель водосбора, которая позволяла бы правдоподобно оценивать изменения водного стока и биогенной нагрузки при различных сценариях хозяйствен-

ной деятельности и изменениях климата. Для решения этих задач в ИАС будет использована модель Института озероведения РАН [Кондратьев, Шмакова, 2019], на которой рассчитываются различные сценарии поступления в озеро воды и биогенных элементов как с речным стоком основных притоков, так и с береговой линии, минуя речную сеть.

Модель формирования стока с водосбора ILHM (Institute of Limnology Hydrological Model) предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора. Модель описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регули-

рование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель формирования биогенной нагрузки на водосборе ILLM (Institute of Limnology Load Model) разработана на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса биогенов [Кондратьев и др., 2016]. Система ILHM+ILLM моделей относится к типу детерминированно-стохастических и включает в себя блок генерирования продолжительных рядов метеорологических элементов в качестве входа в последующие детерминированные блоки модели, описывающие сток и вынос примесей

с водосбора (рис. 4). Ориентация на данные метеорологических наблюдений в качестве основы детерминированно-стохастического моделирования объясняется тем, что, как правило, ряды измеренных значений метеорологических параметров существенно более продолжительны, чем стоковые ряды и тем более ряды измеренных значений выноса примесей с водосбора. Модель предназначена для количественной оценки нагрузки общим фосфором и общим азотом, сформированной различными источниками загрязнения, и прогноза изменения нагрузки под влиянием возможных антропогенных и климатических изменений.

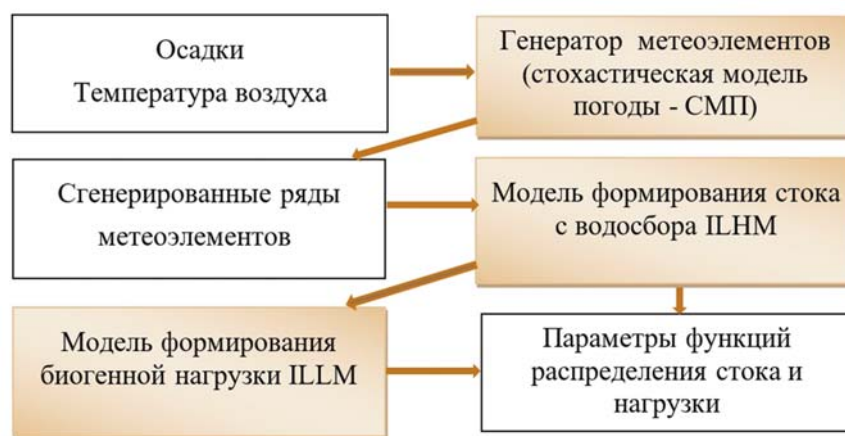


Рис. 4. Схема детерминированно-стохастической моделирующей системы «погода – сток – биогенная нагрузка» [Кондратьев и др., 2016]

Fig. 4. Scheme of the deterministic-stochastic modeling system 'weather – runoff – biogenic load' [Kondrat'ev et al., 2016]

При разработке модели водосбора Онежского озера будут использованы подмодели частных водосборов основных рек – Водлы, Шуи и Суны, рек Заонежья, водосборов малых восточных, южных и западных притоков. Будет выполнен сбор и анализ информации о структуре подстилающей поверхности частных водосборов на основе результатов дешифрирования космических снимков. Планируется получить современные данные о диффузной сельскохозяйственной нагрузке на изучаемые водосборы, формируемой животноводческими фермами, внесением органических и минеральных удобрений, изъятием с выращенным урожаем и т. д. Будут выполнены сценарные расчеты стока с водосбора и поступающей с водосбора биогенной нагрузки, формируемых в результате прогнозируемых климатических и социально-экономических изменений.

Информационно-аналитическая система обработки и анализа модельных и натуральных данных

Обобщенный подход к разработке информационно-аналитических систем (ИАС) поддержки принятия управленческих решений предложен Г. А. Угольницким и А. Б. Усовым [2008]. Указывается, что подобная система должна включать в себя блоки, связанные с данными натуральных наблюдений, результатами моделирования, информацией о нормативно-правовой базе по использованию водных ресурсов, а также экспертную подсистему. Для осуществления системного подхода ИАС должна обеспечивать трехстороннее взаимодействие между: а) лицами, принимающими решения, б) экспертами в области естественных и гуманитарных наук и в) специалистами,

обеспечивающими работоспособность моделей и получение данных натуральных измерений. Такое взаимодействие оптимизирует разработку сценариев планируемого использования водных объектов и проведение прогностических расчетов будущего состояния объекта при различных сценариях использования с последующими рекомендациями для управленческих решений.

Одной из основных задач нашего проекта является разработка ИАС, которая может стать подсистемой более полной информационно-аналитической системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами Онежского озера и его водосбора. Разрабатываемая в виде интерактивного приложения для ПК информационно-аналитическая система включает в себя модуль сбора и обработки данных натуральных наблюдений и подсистему математических моделей.

Функционал данной ИАС должен обеспечивать пространственно-временную визуализацию как непосредственных результатов моделирования и данных натуральных измерений, привязанных к электронной основе Онежского озера, так и продуктов их индивидуального и совместного анализа разного уровня обобщения (статистика, интегрирование, корреляционный анализ и т. п.). Исходя из требуемого функционала, ИАС одновременно должна сочетать в себе два класса информационных подсистем – экспертный, позволяющий проводить анализ первичных данных натуральных измерений и результатов моделирования профильными специалистами, и аналитический, включающий обобщенные на экспертном уровне результаты, представляющие собой набор интегральных карт и таблиц для широкого круга пользователей, включая водопользователей и лиц, принимающих решения.

Организация описанного выше функционала ИАС предусматривает наличие следующих объединенных в единое целое подсистем:

- Высокорастворимая цифровая картографическая основа озера и водосбора.
- База натуральных и спутниковых данных, с инструментами анализа и отображения.
- Результаты моделирования озера и водосбора, с инструментами обработки и отображения результатов.
- Инструменты совместного анализа и отображения результатов моделирования и данных контактных и дистанционных наблюдений.
- Модуль, обеспечивающий запросы внешних пользователей ИАС для прове-

дения расчетов с целью оценки влияния на экосистему планируемых мероприятий по водопользованию.

Важным аспектом в технической (программной) реализации ИАС является выбор и обоснование программного обеспечения и технических средств. Анализ мирового и отечественного опыта в создании ИАС и геоинформационных систем (ГИС) для поддержки проведения мульти- и междисциплинарных научных исследований [Шокин, 2008; Zavala-Romero et al., 2014; Kulawiak et al., 2019] показал, что наиболее оптимальным решением для создания программной оболочки ИАС является веб-приложение (клиент-серверное приложение, где логика и формирование запросов на обработку и анализ информации распределены между сервером и клиентом, а хранение данных осуществляется на сервере). Преимущества веб-приложений перед настольными приложениями очевидны: возможность расширения и масштабирования с другими решениями и внешними системами; не требуется установка на индивидуальных ПК; обновления выполняются без участия пользователя; мгновенный доступ. В качестве инструментов разработки ИАС используются программные продукты с открытым исходным кодом, что позволяет использовать последние наработки мирового уровня в данной области.

Заключение

1. Разрабатывается информационно-аналитическая система Онежского озера и его водосбора, предназначенная для проведения сценарных расчетов и выработки научных рекомендаций по решению широкого спектра фундаментальных и прикладных проблем функционирования экосистемы Онежского озера в условиях климатических и социо-экономических изменений.

2. Помимо решения исследовательских задач разрабатываемая ИАС послужит как прототипом подобных систем для других больших озер России, так и материальной основой и средством внедрения методологии реального системного исследования водоема.

3. В пригодном для эксплуатации виде ИАС будет состоять из трех взаимодействующих модулей, находящихся сейчас на разных уровнях готовности.

4. Совершенствование имеющейся работоспособной трехмерной модели экосистемы озера SPLEM потребует повышения ее базового горизонтального разрешения до 1000 м с возможностью дальнейшей детализации

и/или модификации формулировок модели, необходимых для решения той или иной конкретной задачи.

5. Имеющиеся модели формирования речного стока с водосбора и поступления речной и диффузной нагрузки биогенными элементами будут использоваться для выработки граничных условий для модели озера в зависимости от выбранных сценариев изменений.

6. Разрабатываемая информационно-аналитическая система обработки и анализа модельных и натурных данных может послужить основой систем поддержки принятия решений.

Литература

- Беляев В. И. Математическое моделирование экосистем морей и океанов // Итоги науки и техники. Сер. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. М., 1980. Т. 5. С. 105–153.
- Данилов-Данильян В. И., Хранович И. Л. Управление водными ресурсами. М.: Научный мир, 2010. 223 с.
- Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.
- Исаев А. В., Савчук О. П. Диагноз состояния экосистемы Ладожского озера и прогноз изменений при возможном изменении климата на основе математического моделирования биогеохимических потоков вещества // Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистемы великих озер России / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 197–208.
- 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. doi: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73
- Кондратьев С. А., Шмакова М. В., Маркова Е. Г., Лозовик П. А., Брюханов А. Ю., Чичкова Е. Ф. Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования // Известия РГО. 2016. Т. 148, вып. 5. С. 53–64.
- Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.
- Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Ред. Н. Н. Филатов (отв. ред.), Н. М. Калинкина, Т. П. Куликова, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовик. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
- Меншуткин В. В., Воробьева О. Н. Модель экосистемы Ладожского озера // Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л.: Наука, 1987. С. 187–200.
- Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Математические модели водных экосистем в задачах управления ресурсами озер // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 3. 2014а. С. 100–108.
- Меншуткин В. В., Руховец Л. А., Филатов Н. Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем // Водные ресурсы. 2014б. Т. 41, № 1. С. 24–38. doi: 10.7868/S0321059614010088
- Никитин В. М., Абасов Н. В., Бычков И. В., Осипчук Е. Н. Уровненный режим озера Байкал: проблемы и противоречия // География и природные ресурсы. 2019. № 4. С. 74–83. doi: 10.21782/GIPRO206-1619-2019-4(74-83)
- Румянцев В. А., Филатов Н. Н., Кондратьев С. А. Современное состояние и совершенствование системы мониторинга Ладожского озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера. 2021. С. 540–558.
- Руховец Л. А., Петрова Н. А., Меншуткин В. В., Астраханцев Г. П., Минина Т. Р., Полозков В. Н., Петрова Т. Н., Сусарева О. М. Исследование реакции экосистемы Ладожского озера на снижение фосфорной нагрузки // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 6. С. 740–752.
- Угольницкий Г. А., Усов А. Б. Информационно-аналитическая система управления эколого-экономическими объектами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 2. С. 168–176.
- Шокин Ю. И., Добрецов Н. Н., Пестунов И. А., Молородов Ю. И., Смирнов В. В., Синявский Ю. Н. Система сбора, хранения и обработки спутниковых и наземных данных Новосибирского научного центра СО РАН // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. Сер. Математика, механика, информатика. № 4(59). С. 371–376.
- Berezina A., Yakushev E., Savchuk O., Vogelsang C., Staalstrom A. Modelling the influence from biota and organic matter on the transport dynamics of microplastics in the water column and bottom sediments in the Oslo Fjord // Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2021. Vol. 13(19). Art. 2690. doi: 10.3390/w13192690
- Di Toro D. M., Connolly J. P. Mathematical models of water quality in large lakes. Lake Erie eutrophication of waters: Monitoring // Assessment and Control. Paris: OECD, 1982. 154 p.
- Gloege L., McKinley G. A., Mooney R. J., Allan J. D., Diebel M. W., McIntyre P. B. Lake hydrodynamics intensify the potential impact of watershed pollutants on coastal ecosystem services // Environ. Res. Lett. IOP Publ. 2020. Vol. 15, no. 6. Art. 064028. doi: 10.1088/1748-9326/ab7f62
- Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification // Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2020. Vol. 12, no. 5. P. 1307. doi: 10.3390/w12051307
- Isaev A. V., Savchuk O. P., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem,

1985–2015. Part I: Long-term dynamics and spatial distribution // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 76–97. doi: 10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg

Jenny J.-Ph., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists' warning to humanity: Rapid degradation of the world's large lakes // *J. Great Lakes Res.* 2020. Vol. 46, iss. 4. P. 686–702. doi: 10.1016/j.jglr.2020.05.006

Jorgensen S. E. *Fundamentals of ecological modelling*. Elsevier Publ. House, 1994. 450 p.

Kulawiak M., Dawidowicz A., Pacholczyk M. E. Analysis of server-side and client-side Web-GIS data processing methods on the example of JTS and JSTS using open data from OSM and geoportal // *Computers & Geosciences*. 2019. Vol. 129. P. 26–37. doi: 10.1016/j.cageo.2019.04.011

Marshall J., Hill C., Perelman L., Adcroft A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1997. Vol. 102, no. C3. P. 5733–5752. doi: 10.1029/96JC02776

Mooij W. M., Trolle D., Arhonditsis G. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches // *Aquat. Ecol.* 2010. Vol. 44, no. 3. P. 633–667. doi: 10.1007/s10452-010-9339-3

Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: a review // *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 636. P. 339–354. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.183

Rukhovets L., Filatov N. *Ladoga and Onego – Great European lakes: Observations and modeling* // Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. doi: 10.1007/978-3-540-68145-8

Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model // *J. Marine Syst.* 2002. Vol. 32, no. 4. P. 253–280. doi: 10.1016/S0924-7963(02)00039-8

Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. BALSEM – a marine model for decision support within the Baltic Sea region // Stockholm University. Technical Report 7. 2012.

Savchuk O. P., Isaev A. V., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part II: Seasonal dynamics and spatial features; integral fluxes // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022. Vol. 15(2). P. 98–109. doi: 10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8

Scavia D., DePinto J. V., Bertani I. A multi-model approach to evaluating target phosphorus loads for Lake Erie // *J. Great Lakes Res.* 2016. Vol. 42, no. 6. P. 1139–1150. doi: 10.1016/j.jglr.2016.09.007

Soerensen A. L., Schartup A. T., Gustafsson E., Gustafsson B. G., Undeman E., Björn E. Eutrophication increases phytoplankton methylmercury concentrations in a coastal sea – A Baltic Sea case study // *Environ. Sci. Technol.* 2016. Vol. 50. P. 11787–11796. doi: 10.1021/acs.est.6b02717

Straskraba M., Gnauck A. *Freshwater ecosystems. Modelling and simulation* // Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1985.

Undeman E., Gustafsson E., Gustafsson B. G. A novel modeling tool with multi-stressor functionality for organic contaminant transport and fate in the Baltic Sea // *Sci. Tot. Environ.* 2014. Vol. 497-498. P. 382–391.

Vinçon-Leite B., Casenave C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review // *Sci. Total Environ.* 2019. No. 651. P. 2985–3001. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.139

Wulff F., Sokolov A., Savchuk O. P. Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea. A user manual // Baltic Nest Institute, Stockholm University Baltic Sea Centre, Technical Report No. 10. 2013.

Zavala-Romero O., Ahmed A., Chassignet E. P., Zavala-Hidalgo J., Eguarte A. F., Meyer-Baese A. An open source Java web application to build self-contained web GIS sites // *Environ. Model. Softw.* 2014. Vol. 62. P. 210–220. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.08.029

References

Belyaev V. I. Mathematical modeling of ecosystems of seas and oceans. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Obshchaya ekologiya. Biotsenologiya. Gidrobiologiya = Results of Science and Technology. Ser. General Ecology. Biocenology. Hydrobiology*. 1980. Vol. 5. P. 105–153. (In Russ.)

Berezina A., Yakushev E., Savchuk O., Vogelsang C., Staalstrom A. Modelling the influence from biota and organic matter on the transport dynamics of microplastics in the water column and bottom sediments in the Oslo Fjord. *Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2021;13(19):2690. doi: 10.3390/w13192690

Danilov-Danil'yan V. I., Khranovich I. L. *Management of water resources*. Moscow: Nauchnyi mir, 2010. 223 p. (In Russ.)

Di Toro D. M., Connolly J. P. Mathematical models of water quality in large lakes. Lake Erie eutrophication of waters: Monitoring. *Assessment and Control*. Paris: OECD; 1982. 154 p.

Filatov N. N. (ed.). *Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020. 255 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Kalinkina N. M., Kulikova T. P., Litvinenko A. V., Lozovik P. A. The largest lakes-reservoirs of the North-West of the European part of Russia: The current state and changes in ecosystems under climatic and man-induced impact. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 375 p. (In Russ.)

Gloege L., McKinley G. A., Mooney R. J., Allan J. D., Diebel M. W., McIntyre P. B. Lake hydrodynamics intensify the potential impact of watershed pollutants on coastal ecosystem services. *Environ. Res. Lett. IOP Publ.* 2020;15(6):064028. doi: 10.1088/1748-9326/ab7f62

Isaev A. V., Sachuk O. P. Diagnosis of the state of the Lake Ladoga ecosystem and forecast of changes in case of possible climate change based on mathematical modeling of biogeochemical fluxes of matter. *Diagnoz i prognoz termogidrodinamiki i ekosistemy velikikh ozer Rossii = Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2020. P. 197–208. (In Russ.)

Isaev A. V., Savchuk O. P., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosys-

- tem, 1985–2015. Part I: Long-term dynamics and spatial distribution. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2):76–97. doi: 10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvg
- Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V., Savchuk O. Accounting for dissolved organic nutrients in an SPBEM-2 model: Validation and verification. *Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020;12(5):1307. doi: 10.3390/w12051307
- Jenny J.-Ph., Anneville O., Arnaud F. et al. Scientists' warning to humanity: Rapid degradation of the world's large lakes. *J. Great Lakes Res.* 2020;46(4):686–702. doi: 10.1016/j.jglr.2020.05.006
- Jorgensen S. E. Fundamentals of ecological modeling. Elsevier Publ. House; 1994. 450 p.
- Kalinkina N. M., Filatov N. N., Tekanova E. V., Balaganskii A. F. Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Lake Onego with Shuya River under climate change conditions. *Regional'naya ekologiya – Regional Ecology*. 2018;2(52):7–15. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V., Markova E. G., Lozovik N. A., Bryukhanov A. Yu., Chichkova E. F. Biogenic load on Lake Onega from scattered sources based on the results of mathematical modeling. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva – The RGS Herald*. 2016;148(5):53–64. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the catchment - watercourse - reservoir system. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2019. 248 p. (In Russ.)
- Kulawiak M., Dawidowicz A., Pacholczyk M. E. Analysis of server-side and client-side Web-GIS data processing methods on the example of JTS and JSTS using open data from OSM and geoportal. *Computers & Geosciences*. 2019;129:26–37. doi: 10.1016/j.cageo.2019.04.011
- Marshall J., Hill C., Perelman L., Adcroft A. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1997;102(C3):5733–5752. doi: 10.1029/96JC02776
- Ménesguen A., Lacroix G. Modelling the marine eutrophication: A review. *Sci. Total Environ.* 2018;636:339–354. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.183
- Menshutkin V. V., Vorob'eva O. N. A model of the Lake Ladoga ecosystem. *Sovremennoe sostoyanie ekosistemy Ladozhskogo ozera – Current state of the Lake Ladoga ecosystem*. Leningrad: Nauka; 1987. P. 187–200. (In Russ.)
- Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Mathematical models of aquatic ecosystems in lakes resources management. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie – Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2014a; 3:100–108. (In Russ.)
- Menshutkin V. V., Rukhovets L. A., Filatov N. N. Modeling of ecosystems of freshwater lakes (a review) 2. Models of ecosystems. *Vodnye resursy – Water Resources*. 2014b;41(1):24–38. (In Russ.)
- Mooij W. M., Trolle D., Arhonditsis G. et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches. *Aquat. Ecol.* 2010;44(3):633–667. doi: 10.1007/s10452-010-9339-3
- Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea. URL: <https://nest.su.se/nest> (accessed: 19.08.2022).
- Nikitin V. M., Abasov N. V., Bychkov I. V., Osipchuk E. N. Level regime of Lake Baikal: Problems and contradictions. *Geografiya i prirodnye resursy – Geography and Natural Resources*. 2019;4:74–83. (In Russ.)
- Rukhovets L., Filatov N. Ladoga and Onego – Great European lakes: Observations and modeling. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2010. doi: 10.1007/978-3-540-68145-8
- Rukhovets L. A., Petrova N. A., Menshutkin V. V., Astrakhantsev G. P., Minina T. R., Polozkov V. N., Petrova T. N., Susareva O. M. Study of the Lake Ladoga ecosystem response to a decrease in phosphorus load. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2011. Vol. 38(6). P. 740–752. (In Russ.)
- Rumyantsev V. A., Filatov N. N., Kondrat'ev S. A. Current state and improvement of the monitoring system of Lake Ladoga. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera – Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga*. 2021. P. 540–558. (In Russ.)
- Savchuk O. P. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: scaling up field studies with a mathematical model. *J. Marine Syst.* 2002;32(4):253–280. doi: 10.1016/S0924-7963(02)00039-8
- Savchuk O. P., Gustafsson B. G., Muller-Karulis B. BALTSEM – a marine model for decision support within the Baltic Sea region. *Stockholm University. Technical Report 7*. 2012.
- Savchuk O. P., Isaev A. V., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part II: Seasonal dynamics and spatial features; integral fluxes. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2):98–109. doi: 10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8
- Scavia D., DePinto J. V., Bertani I. A multi-model approach to evaluating target phosphorus loads for Lake Erie. *J. Great Lakes Res.* 2016;42(6):1139–1150. doi: 10.1016/j.jglr.2016.09.007
- Shokin Yu. I., Dobretsov N. N., Pestunov I. A., Molorodov Yu. I., Smirnov V. V., Sinyavskii Yu. N. System for collecting, storing and processing satellite and terrestrial data of the Novosibirsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational Technologies*. Vol. 13. Series Mathematics, mechanics, computer science. 2008;4(59):371–376. (In Russ.)
- Soerensen A. L., Schartup A. T., Gustafsson E., Gustafsson B. G., Undeman E., Björn E. Eutrophication increases phytoplankton methylmercury concentrations in a coastal sea – A Baltic Sea case study. *Environ. Sci. Technol.* 2016;50:11787–11796. doi: 10.1021/acs.est.6b02717
- Straskraba M., Gnauck A. Freshwater ecosystems. Modelling and simulation. Elsevier Science Publishers, Amsterdam; 1985.
- Ugol'nitskii G. A., Usov A. B. Information-analytical system for management of ecological and economic objects. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*

= *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2008;2:168–176. (In Russ.)

Undeman E., Gustafsson E., Gustafsson B. G. A novel modeling tool with multi-stressor functionality for organic contaminant transport and fate in the Baltic Sea. *Sci. Tot. Environ.* 2014;497-498:382–391.

Vinçon-Leite B., Casenave C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. *Sci. Total Environ.* 2019;651:2985–3001. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.139

Wulff F., Sokolov A., Savchuk O. P. Nest – a decision support system for management of the Baltic Sea. A user manual. Baltic Nest Institute, *Stockholm University Baltic Sea Centre, Technical Report No. 10*. 2013.

Zavala-Romero O., Ahmed A., Chassignet E. P., Zavala-Hidalgo J., Eguiarte A. F., Meyer-Baese A. An open source Java web application to build self-contained web GIS sites. *Environ. Model. Softw.* 2014;62:210–220. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.08.029

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 22.09.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филатов Николай Николаевич

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, профессор,
главный научный сотрудник, советник генерального
директора КарНЦ РАН

e-mail: nfilatov@rambler.ru

Баклагин Вячеслав Николаевич

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

e-mail: slava.baklagin@mail.ru

Исаев Алексей Владимирович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: isaev1975@gmail.com

Кондратьев Сергей Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник

e-mail: kondratyev@limno.org.ru

Савчук Олег Павлович

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: olegstobni@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Filatov, Nikolai

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,
Chief Researcher, Advisor to KarRC RAS Director General

Baklagin, Vyacheslav

Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher

Isaev, Alexey

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Kondratyev, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher

Savchuk, Oleg

Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher

УДК 504.06

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭКОСИСТЕМНЫХ УСЛУГ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Н. Л. Болотова*, И. А. Мухин, О. Г. Лопичева

Вологодский государственный университет (ул. Ленина, 15, Вологда, Россия, 160000),
* bolotova.vologda@mail.ru

Опасность деградации экосистемы Ладожского озера под влиянием многофакторной антропогенной нагрузки определяет необходимость наряду с правовыми и административными методами использовать экономические подходы к ресурсному регулированию. С этой точки зрения в статье обосновывается перспективность реализации концепции экосистемных услуг, целевой установкой которой служит стоимостная оценка ресурсов экосистемы для принятия адекватных управленческих решений. Рассмотрено состояние природных ресурсов Ладожского озера как условий формирования экосистемных услуг. Идентифицированы производственные, средообразующие, информационные, духовно-эстетические и рекреационные услуги, требующие экономической оценки. Определены индикаторы снижения качества средообразующих и производственных услуг. В рамках концепции природного капитала оценены потенциальные объемы экосистемных услуг/выгод Ладожского озера (1,6 трлн руб.), стоимости его воды (690 млрд руб.) и земель ООПТ Приладожья (37,9 млрд руб.) Общая стоимость рекреационных, информационных услуг, а также рефугиумной функции ООПТ Приладожья составляет 55,2 млн руб./год. Общая стоимость некоторых реализуемых компонентов экосистемных услуг Ладожского озера достигает 4166,7 млн руб./год, включая потребление питьевой воды, развитие аквакультуры, туристические (о. Валаам) и транспортные услуги. Наибольшие доходы от средообразующей услуги Ладожского озера получает Волго-Балтийский транспортный путь, но его функционирование сопровождается ухудшением качества воды в южной части озера. Выявление выгодополучателей этой транзитной транспортной услуги и разработка схем компенсационных платежей рассматривается как один из механизмов получения альтернативных ресурсов финансирования природоохранных проектов для поддержания устойчивого состояния экосистемы Ладожского озера.

Ключевые слова: Ладожское озеро; природные ресурсы; природный капитал; экономическая ценность; концепция экосистемных услуг; стоимостная оценка

Для цитирования: Болотова Н. Л., Мухин И. А., Лопичева О. Г. Подходы к оценке экосистемных услуг Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 173–187. doi: 10.17076/lim1632

N. L. Bolotova*, I. A. Mukhin, O. G. Lopicheva. APPROACHES TO ASSESSING ECOSYSTEM SERVICES OF LAKE LADOGA

Vologda State University (15 Lenina St., 160000 Vologda, Russia),
* bolotova.vologda@mail.ru

The threat of Lake Ladoga ecosystem degradation under multifactorial anthropogenic impact requires that, along with legal and administrative methods, economic approaches to resource regulation are used. In this connection, the article substantiates the prospects of applying the concept of ecosystem services, which has the aim of ecosystem resource valuation for subsequent introduction of a system of compensation payments and adequate decision-making. The state of natural resources of Lake Ladoga is considered as the footing for the formation of ecosystem services. Productivity, environment-shaping, informational, mental-aesthetic and recreational services that require economic valuation were identified. Indicators of a degradation of the quality of environment-forming and productivity services were determined. The potential volumes of ecosystem services/benefits of Lake Ladoga (1.6 trillion rubles), the value of its water (690 billion rubles) and ecosystem services of the lands in protected areas of the Ladoga region (37.9 billion rubles) were estimated. The total value of recreational and information services and the refugium function of Ladoga region's protected areas is 55.2 million rubles per year. The total value of some utilized components of Lake Ladoga ecosystem services is 4166.7 million rubles per year, including drinking water, aquaculture, tourism (Valaam Island) and transport services. The largest beneficiary of the environment-shaping service of Lake Ladoga is the Volga-Baltic transport route, but its operation entails a deterioration of the water quality in the southern part of the lake. Identification of the beneficiaries of this transit transport service and the development of compensation payment schemes is one of the mechanisms for finding alternative sources of funding for environmental projects to maintain a sustainable state of the Lake Ladoga ecosystem.

Keywords: Lake Ladoga; natural resources; natural capital; economic value; concept of ecosystem services; valuation

For citation: Bolotova N. L., Mukhin I. A., Lopicheva O. G. Approaches to assessing ecosystem services of Lake Ladoga. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 173–187. doi: 10.17076/lim1632

Введение

Ладожское озеро, расположенное на Северо-Западе России, относится к великим озерам Европы, и опасность деградации его экосистемных функций представляет собой проблему, выходящую за региональные рамки. Ряд ученых акцентируют внимание на геостратегическом статусе Ладожского озера, обусловленном географическим положением, масштабом акватории и водосбора, богатейшим природным, культурным наследием и экономической значимостью при развитой инфраструктуре, включая вхождение в состав Единой глубоководной системы европейской части РФ [Поздняков и др., 2021; Современное..., 2021 и др.].

Негативные процессы, связанные с поступлением токсических веществ и эвтрофированием, в первую очередь выразились в ухудшении качества воды в отдельных зонах озера и изменении биоразнообразия, что, соответственно, влияет на использование как водных, так и биологических ресурсов. В результате возникают социально-экономические проблемы, требующие адекватных управленческих решений по снижению антропогенного пресса в рамках задач восстановления экосистемных

функций Ладожского озера и экологической безопасности [Румянцев, Кудерский, 2010 и др.]. Это возможно только при экосистемном подходе к эксплуатации озера, чему препятствует существующее ведомственное разделение ресурсов на водные и биологические. Традиционным управленческим механизмом служит нормирование государственными структурами сбросов загрязняющих веществ и ограничение добычи биологических ресурсов. Однако результаты исследования Ладожского озера в течение многих десятилетий показали, что снижение антропогенной нагрузки не является универсальным средством предотвращения деградации экосистемы [Современное..., 2021 и др.].

В рамках поиска альтернативных вариантов подходов к управлению озером особое внимание исследователи уделяют проблемам адекватности организации мониторинга и моделирования экосистемных процессов, а также правовому регулированию и необходимости принятия федерального закона «Об охране Ладожского озера» [Румянцев и др., 2008; Филатов, 2017; Диагноз..., 2020]. Показано, что сложность долгосрочного прогнозирования, особенно в условиях изменения климата, за-

трудняет планирование хозяйственной деятельности и сохранения ресурсов, а медленное и дорогостоящее восстановление озера при ускорении его деградации определяет необходимость наряду с правовыми и административными методами использовать экономические подходы к регулированию [Современное..., 2021]. В публикациях неоднократно указывалось на значимость экономической оценки ресурсов озера, включая водные, биологические, транспортные и рекреационные [Алхименко, Цветков, 2010; Филатов, 2017 и др.].

В этом смысле перспективным подходом может служить реализация концепции экосистемных услуг (КЭУ), основанная на экономической оценке тех выгод, которые предоставляет человеку экосистема, выборе приоритетных направлений использования в пределах, не нарушающих ее функционирование. Данный подход широко распространен, успешно опробован в мировой практике и описан во множестве публикаций, но пока ограниченно применяется в нашей стране, особенно в отношении водных экосистем [Фоменко и др., 2002; Бобылев и др., 2008; Розенберг, 2015; Болотова, 2017а и др.]. Наиболее важной целевой установкой реализации концепции экосистемных услуг является их стоимостная оценка для последующего внедрения системы компенсационных платежей в практику природопользования для принятия обоснованных управленческих решений.

Заметное увеличение в последние десятилетия исследований экосистемных услуг в регионах России подтверждает, что сохранение природных экосистем и их альтернативное использование может превышать выгоду от хозяйственной эксплуатации [Тишков, 2005; Пятый..., 2015; Розенберг, 2015; Завадская и др., 2017; Тихонова, 2019 и др.]. В отношении рассматриваемого в статье региона имеются публикации расчетов стоимости отдельных услуг экосистем Ленинградской области [Ситкина, 2017; Кулаковская, Санин, 2021], но без выделения вклада Ладожского озера. Настоящее исследование направлено на привлечение внимания к стоимостной оценке некоторых экосистемных услуг Ладожского озера, учитывая изменение его состояния и геостратегическую значимость.

Целью работы был анализ факторов формирования основного комплекса экологических услуг Ладожского озера и определение их экономической ценности для обоснования подхода к экосистемной стратегии управления озером в рамках концепции экосистемных услуг.

Материалы и методы

Методологическим основанием комплексной оценки стоимости экосистемных услуг служат три составляющие: экологическая – как оценка способности экосистем выполнять свои функции; экономическая, связанная с интеграцией оценки в механизмы принятия решений, и социальная – необходимая для обеспечения согласованных решений общества и снятия конфликтов.

Подход к оценке экологической составляющей экосистемных услуг на первом этапе наших исследований заключался в выявлении степени нарушения функционирования экосистемы Ладожского озера, что создает угрозу потери соответствующих экосистемных услуг. Методологическим приемом для выполнения данной задачи послужил анализ многочисленных публикаций, отражающий высокую степень и продолжительность изученности водоема, что позволяет проследить изменение факторов, влияющих на формирование экосистемных услуг. Тем более что на фоне сильной антропогенной нагрузки 1960–70-х годов началось быстрое изменение состояния экосистемы озера, что подтверждается материалами таких монографий, как «Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера» (1982), «Современное состояние Ладожского озера» (1987), «Ладожское озеро. Критерии состояния экосистемы» (1992), «Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами» (2000), «Ладожское озеро, прошлое, настоящее, будущее» (2002). Авторы этих трудов описали негативные процессы токсификации и эвтрофирования, а также формирования в литоральной зоне участков «экологического риска», ухудшающих состояние водных и биологических ресурсов и, таким образом, снижающих выгоды от их использования, т. е. объемы и качество экосистемных услуг. Наступивший новый этап развития экосистемы в условиях снижения антропогенной нагрузки, который проанализирован в значимых монографиях XXI века [Литоральная..., 2011; Ладога..., 2013; Современное..., 2021], дал возможность проследить влияние происходящих процессов на состояние водных и биологических ресурсов в рамках задачи нашего исследования.

Соответственно, следующий этап работы касался проведения идентификации экосистемных услуг Ладожского озера и анализа условий, их формирующих. Для оценки объема экосистемных услуг использовались индикаторы

торы в натуральной и стоимостной форме и классификация, принятая для Национальной стратегии сохранения биоразнообразия России [Пятой..., 2015]. Данная классификация включает производственные (обеспечивающие), средообразующие (поддерживающие и регулирующие), информационные, духовно-эстетические, рекреационные (культурные) экосистемные услуги. Среди них приоритетными объектами исследования выбраны производственные и рекреационные – как услуги прямого использования для последующего определения их ценности, а также выгодополучателей, что требуется для выработки рекомендаций по формированию компенсационного механизма.

Выбор для исследований производственных и рекреационных экосистемных услуг Ладожского озера основывался на нескольких критериях: приоритет этого комплекса с позиций природопользования для обеспечения потребностей экономики и населения; возможность рыночной прямой и косвенной стоимостной оценки производственных (вода, рыба) и рекреационных (транспортных, туристических) услуг; перспектива интеграции экономического анализа ценности природного капитала, включающего расчет экосистемных услуг Ладожского озера в процесс принятия управленческих решений.

В рамках первой попытки оценки экосистемных услуг Ладожского озера объектами исследования стали: потенциальная стоимость воды озера и ресурсов питьевой воды, в частности, объемов водопотребления Санкт-Петербурга; доходы от рыбодобычи и аквакультуры; транспортные услуги, включая Волго-Балтийский водный путь и функционирование в акватории рыболовецкого флота; стоимость туристических услуг, связанных с островом Валаам, стоимость земель ООПТ Приладожья, как поддерживающей и регулирующей функции. Учитывая отсутствие единой методики оценки экосистемных услуг, в инструментарий наших исследований Ладожского озера вошли разные методы стоимостной оценки.

Известна оценка на глобальном уровне экономической ценности всех видов экосистем и биомов, в рамках которой рассчитана стоимость экосистемных услуг озер и рек в денежной форме на единицу площади [Costanza et al., 2014]. Это дает возможность ориентировочной экономической оценки Ладожского озера по его площади.

Для конкретизации стоимости производственных услуг, обеспеченных водными ресурсами Ладожского озера, проведена оценка общих

запасов и потенциальных ресурсов питьевой воды с использованием опубликованных расчетов объема водных масс [Современное..., 2021], а также размеров платы за водопользование, установленной Правительством РФ. Расчет реального компонента водопользования сделан на примере самого крупного потребителя – населения Санкт-Петербурга, основным источником водоснабжения которого через сток реки Невы является Ладожское озеро. Сведения об объемах городского водопотребления имеются на официальном сайте городского водоканала [Цифры..., 2022].

Производственные услуги, связанные с рыбоводством, оценивали через его вклад в экономику – создание рабочих мест и доход населения. Для оценки количественных показателей использовали открытые статистические показатели по уплате платежей в фонд социального страхования рыболовными предприятиями, расположенными на Ладожском озере. Список предприятий составляли по каталогам юридических адресов предприятий и по данным картографических онлайн-сервисов. По платежам в фонд социального страхования за 2019 год оценили величину заработной платы, исходя из стандартной ставки налоговых отчислений. Используя данные среднесписочной численности работников, рассчитали среднемесячную зарплату сотрудника. Для компаний, у которых отсутствовали отчеты, применили показатель средней численности сотрудников, вычисленный для аналогичных предприятий отрасли в 2019 году. В результате оценили суммарное число рабочих мест на рыболовных предприятиях на Ладожском озере и среднемесячную зарплату сотрудника.

Стоимость экосистемных услуг в отношении водного транспорта рассчитывали как стоимость прямого использования. Исходили из того, что перевозка грузов по водным путям обходится дешевле по сравнению с автомобильными и железными дорогами, так как водные пути проще в обслуживании и обеспечивают поддержку большей грузоподъемности транспортных средств. Для сравнения выбран автомобильный транспорт, как наиболее массовый. На основе официальных данных устанавливали общий объем грузоперевозок автомобильным транспортом в России за год, а затем соотносили его со стоимостью поддержания автомобильной инфраструктуры. Полученная величина характеризовала затраты экономики на поддержание в рабочем состоянии одного километра пути, по которому осуществляется транспортировка одной

тонны грузов на километр по автомобильным дорогам. Аналогичным путем вычисляли стоимость поддержания водной инфраструктуры (которая намного ниже, так как водная поверхность не требует специального ухода в отличие от дорожного полотна). Разница в стоимости поддержания путевой инфраструктуры давала экономический выигрыш на каждую перевезенную на один километр тонну. Для пассажирского транспорта приводили аналогичные вычисления, рассматривая пассажира как груз и установив средний необходимый для провоза одного пассажира тоннаж судна. Общую стоимость экосистемных услуг Ладожского озера определили, умножив протяженность водного маршрута в акватории на величину грузооборота (по данным на 2019 год). В оценку транспортной услуги также включили сведения о рыболовном флоте, который не задействован в грузоперевозках, но также эксплуатирует акваторию озера для перемещения. Для этого использовали данные из открытых источников о тоннаже и количестве рыболовных судов, оценив интенсивность их движения и длину проходимых маршрутов.

Для оценки рекреационных услуг Ладожского озера были выбраны популярные у туристов объекты – о. Валаам и ООПТ Приладожья. Выгоды от туризма на остров Валаам оценивали через показатели посещения туристами острова, используя метод рыночных цен. Доход организаторов туров рассчитывали на основе данных Росстата за 2021 год о численности лиц, использующих коллективные средства размещения, объемах доходов туристических агентств, гостиниц и аналогичных средств размещения за указанный период [Статистический..., 2021]. Для этого вычисляли среднюю доходность туристического бизнеса от одного клиента, а затем умножали на количество туристов, посещающих архипелаг.

Для анализа экономической ценности ООПТ использовалась стоимость оценки их земель методом переноса стоимости, т. е. путем переноса информации из открытых источников на аналогичный объект. Использовали результаты расчетов предварительной удельной стоимости экосистемных услуг природных ландшафтов России [Пятый..., 2015]. Это стоимость рекреационных услуг, отражающих коммерческое использование ландшафта, с показателем среднего дохода от рекреационной деятельности на ООПТ (1 га/год). Этот показатель умножали на общую площадь ООПТ Приладожья, которую рассчитывали из данных о площадях 17 ООПТ [Ладожское..., 2015]. Ос-

новой для оценки некоммерческого использования ООПТ послужили данные о стоимости информационных услуг на 1 га/год [Пятый..., 2015], которые умножали на общую площадь ООПТ Приладожья. Для оценки рефугиумной функции ООПТ, стоимость которой оценивается для территорий с редкими, исчезающими и эндемичными сообществами и экосистемами, использовали известные из публикаций усредненные данные глобальных оценок в долларах США/га [De Groot et al., 2012] и пересчитывали на общую площадь рассматриваемых в работе ООПТ.

В перспективе для определения экономической ценности Ладожского озера и его водосбора необходимо применение расчета оценок для средообразующих, информационных и духовно-эстетических экосистемных услуг, базирующихся на общей экономической ценности, затратном подходе, альтернативной стоимости и других методах.

Результаты и обсуждение

Идентификация экосистемных услуг Ладожского озера позволила выделить их приоритетный комплекс с точки зрения сочетания следующих критериев: угрозы потери при деградации соответствующей функции экосистемы и возможности монетарной стоимостной оценки как социально-экономического показателя. Это продукционные, средообразующие и рекреационные экосистемные услуги, которые обеспечиваются природным капиталом экосистемы озера.

Среди продукционных экосистемных услуг к приоритетным отнесли использование человеком воды и рыбы. Это учитывает значимость Ладожского озера, содержащего стратегический запас пресной воды (наряду с ухудшением ее качества) и являющегося важным рыбохозяйственным объектом, промышленные запасы и качественный состав уловов которого снижаются. Кроме того, с количеством и качеством этих продукционных ресурсов связано жизнеобеспечение и здоровье населения.

Ладожское озеро относится к великим озерам, и его экономическую ценность можно охарактеризовать исходя из известной оценки экосистемных услуг на глобальном уровне [Costanza et al., 2014]. В этих расчетах стоимость экосистемных услуг озер и рек находится в диапазоне 1779–13487 долл./га в год, и учитывая площадь Ладожского озера 18 329 км², получаем денежную стоимость в пределах 3,2–24,7 млрд долл./год.

Водные ресурсы и оценка водопотребления как экосистемной услуги Ладожского озера

Количественные и качественные показатели водных ресурсов Ладожского озера изначально определяются его уникальностью, включая огромный масштаб акватории (18 329 км²), водосбора (258 600 км²) и глубоководность (до 230 м). Объем озера с использованием цифровых технологий оценивается величиной примерно 847,8 км³ [Современное..., 2021]. Несмотря на антропогенное воздействие, имея огромную площадь и глубоководную зону, озеро оставалось ультраолиготрофным с высоким качеством вод до середины XX века [Современное..., 2021].

К группе ключевых природных факторов, определяющих нестабильность состояния водной среды, относятся межгодовые колебания климатических условий и величины стока с водосбора с площадью в 14,6 раза больше водного зеркала, с которого поступают биогены, определяя уровень продукционных процессов. На фоне динамичности стока и интенсивной антропогенной трансформации водосбора с 1960-х годов возник резонансный эффект, что выразилось в катастрофическом ускорении процесса эвтрофирования в 1970–80-е гг., когда Ладожское озеро из олиготрофного состояния резко перешло в мезотрофное, а отдельные литоральные зоны приобрели черты эвтрофных водоемов [Литоральная..., 2011; Ладога..., 2013]. В настоящее время резонансный эффект, ведущий к ускорению изменений озерной экосистемы, проявляется в связи с климатическими сдвигами, пролонгированные последствия которых диагностируются моделированием [Диагноз..., 2020; Современное..., 2021].

Наличие огромной массы воды Ладожского озера является ценнейшим природным капиталом и основой целого спектра предоставления природопользователям взаимосвязанных экосистемных услуг. Помимо рассматриваемой ниже продукционной услуги в плане водопотребления следует подчеркнуть средообразующую услугу, которая в свою очередь обеспечивает биоразнообразие и продукционную услугу, связанную с рыбными запасами, а также рекреационную, информативную, духовно-эстетическую и, наконец, транспортную услугу.

Однако негативные процессы при антропогенном воздействии на водную среду снижают ее ценность, изменяя экосистемные функции и создавая угрозы их потерь вследствие эвтрофирования озера, а также поступления загрязняющих веществ техногенного характера, в т. ч. с выраженным токсическим воздействием.

При этом выявлено принципиальное отличие отклика экосистемы на избыток биогенных элементов, переводящих ее в другой трофический статус, и выраженной в литоральной зоне реакции на техногенное загрязнение при его деградации вплоть до образования «мертвых зон» [Румянцев, Кудерский, 2010; Литоральная..., 2011]. Проблема возникновения в литорали «зон экологического риска» вблизи источников техногенного загрязнения уменьшает объем и качество экосистемной услуги водопотребления.

В отношении водопотребления качество воды, особенно питьевой, является не менее важной составляющей продукционной услуги, чем ее количество. Поэтому ухудшение качества воды в процессе эвтрофирования Ладожского озера является индикатором угрозы возможной потери данной экосистемной услуги. Так, в период ускорения эвтрофирования до 1990-х гг. происходило снижение качества воды при цветении, уменьшении концентрации растворенного кислорода, снижении прозрачности, повышении мутности. После снижения антропогенной нагрузки изменилась пространственная картина распределения рассматриваемой продукционной услуги, связанной с влиянием на качество воды трофического статуса в разных частях озера. Так, центральная часть акватории озера имела слабomezотрофный статус (при олиготрофном характере гипolimниона), северная – олиготрофный, западная – мезотрофный, а южная часть (Свирская и Волховская губы) – слабоэвтрофный [Современное..., 2021]. Наблюдаемое пространственное деэвтрофирование рассматривается как качественно новый этап в развитии Ладожского озера, что подтверждают исследования состояния трофических уровней экосистемы [Курашов и др., 2018].

Дальнейшее изменение состояния озерной экосистемы определяется не только степенью антропогенной нагрузки, но и инерционностью процессов такого крупного и глубоководного озера при замедленном водообмене. По прогнозной оценке с применением моделирования, период реакции Ладожского озера на внешнее воздействие составляет 12 лет, то есть равен времени условного водообмена [Ладога..., 2013]. При оценке угроз потери качества воды следует учитывать двойственное значение инерционности процессов великого озера. С одной стороны, в глубоководной части слабое воздействие внутриводоемных процессов обеспечивает стабильно хорошее качество воды, пригодное как для всех видов водопотребления и водопользования, так и

для поддержания производственных процессов сообществ, что сохраняет и биоразнообразие. С другой стороны, инерционность большого стратифицированного озера при антропогенном эвтрофировании препятствует его возврату в исходное состояние, что подтверждено результатами моделирования. Причем снижение антропогенной нагрузки не является универсальным средством предотвращения дальнейшего изменения состояния сообщества, что подтвердили результаты натурных исследований [Современное..., 2021].

Выявленную опасность выведения экосистемы Ладожского озера из равновесного функционирования можно рассматривать как потенциальную угрозу потери не только производственных, но и поддерживающих регулирующих экосистемных услуг, связанных с водной средой. Следует подчеркнуть, что на фоне повсеместного эвтрофирования водных экосистем, включая великие озера, возрастает актуальность задачи сохранения огромных водных ресурсов Ладожского озера, в том числе в рамках экономической выгоды.

Это можно проиллюстрировать на примере экосистемной услуги Ладожского озера, связанной с водопотреблением. В этом случае вода является прямой и отчуждаемой услугой и оценивается величиной налоговой ставки, установленной в соответствии с законом за использование ресурса. Потенциальная стоимость воды всего озера составляет около 690 миллиардов рублей, если рассчитывается объем озерных масс, равный 847,8 км³, при установленном в 2021 году размере платежа в 813,96 руб. за тысячу кубических метров [Налоговый..., 2000, ст. 333.12]. Для сравнения приведем опубликованные данные по расчету экосистемных услуг территории Ленинградской области, где общая «стоимость рек как резервуара воды» оценивается величиной 67,7 млрд рублей, т. е. в 10 раз меньшей, чем вклад Ладожского озера [Кулаковская, Санин, 2021].

Крупнейшим потребителем воды является Санкт-Петербург, для которого источником водоснабжения служит р. Нева, сток которой определяет Ладожское озеро [Ладога..., 2013]. Водоканал Санкт-Петербурга отбирает воду из Невы, для которой установлен меньший нормативный платеж за водопользование. В 2021 году он составлял 702,24 рубля за тысячу кубических метров. Среднесуточная подача питьевой воды в Санкт-Петербург равнялась 1 479,8 тыс. м³/сутки [Цифры..., 2022], следовательно, годовой забор воды выражается величиной не менее 0,540 км³. Согласно данным,

обнародованным ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», расходы и потери при транспортировке воды в 2020 году составили 9,3 % [Цифры..., 2022], следовательно, фактическое потребление должно составить не менее 0,590 км³. Исходя из имеющихся данных, с учетом установленной в 2021 году ставки за водопользование стоимость водопотребления Санкт-Петербургом можно оценить в 414,6 млн рублей.

Для сравнения можно привести опубликованные данные стоимости обеспечивающей услуги экосистем на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга, названные как «предоставление воды», которые оцениваются в сумме 5,9 млрд рублей [Ситкина, 2017].

Фактором удорожания стоимости питьевой воды для потребителей является необходимость ее очистки при наблюдаемом ухудшении качества воды р. Невы. Одним из предлагаемых путей улучшения качества питьевой воды для мегаполиса является организация водозабора на акватории Ладожского озера. Строительство и обслуживание водовода увеличит стоимость водоснабжения жителей Санкт-Петербурга, однако компенсационным механизмом будет снижение затрат на дорогостоящую водоподготовку при условии хорошего качества ладожской воды. В свою очередь, это определяет необходимость тщательного выбора района водозабора и минимизацию рисков, связанных с ухудшением качества воды [Кондратьев, Поздняков, 2012].

Существующие различия качества воды необходимо учитывать при оценке пространственной картины распределения данной производственной услуги экосистемы Ладожского озера. Исследования показали, что объемы воды, которые могут быть потенциально использованы для питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга и других крупных населенных пунктов Приладожья, находятся в западной и юго-западной частях акватории Ладожского озера с глубинами более 20 и 50 м. Эти объемы питьевой воды, рассчитанные на основе цифровой модели ложа озера, оцениваются в 555 и 264 км³ [Кондратьев, Поздняков, 2012; Поздняков и др., 2021]. Отсюда потенциальная стоимость питьевой воды как производственной услуги Ладожского озера составляет 666,6 млрд рублей.

Характеристика биоресурсов и подходы к оценке рыбной продукции как экосистемной услуги Ладожского озера

В широком смысле к биологическим ресурсам Ладожского озера относятся все обитающие в нем организмы, участвующие в производственных процессах, что в рамках современных

исследований учитывается на разных трофических уровнях. Помимо того, в озере водится ладожская кольчатая нерпа, с прибрежными зонами связаны околводные и полуводные млекопитающие (58 видов), пролетные и гнездящиеся птицы (более 250 видов), пресмыкающиеся (5 видов) и земноводные (5 видов) [Ладога..., 2013; Ладожское..., 2015; Современное..., 2021]. Все виды играют ту или иную роль в функционировании озера, а значит, и создании разных экосистемных услуг, в первую очередь в поддержании биоразнообразия через участие в пищевых сетях и включение в регулирующую функцию. С биоразнообразием соответственно связано формирование других экосистемных услуг, в т. ч. информационных (например, образовательно-исследовательская деятельность), рекреационно-туристических (например, орнитологический туризм) и духовно-эстетических.

В Ладожском озере основным продукционным биоресурсом с точки зрения продовольственного обеспечения населения является рыбная часть сообщества. Ценность данного сегмента природного капитала обеспечивает высокое биоразнообразие, так как здесь обитает 47 аборигенных видов круглоротых и рыб [Дятлов, 2002]. Значимость рыбных ресурсов озера увеличивает наличие в ихтиофауне ценных видов (озерный лосось, озерная форель, паляя, сига, ряпушка и ее крупная форма рипус). Помимо этого, сохраняющиеся олиготрофные черты водоема поддерживают обитание особо ценного арктического фаунистического комплекса рыб и реликтов микулинского времени. По рыбным запасам Ладожское озеро относится к ведущим внутренним водоемам страны, в целом среднегодовой общий улов рыбы за период 1946–2019 гг. составлял около 3860 т [Современное..., 2021].

Рыбные запасы характеризуются временной динамичностью и пространственной рыбопродукционной неоднородностью. Обширные открытые акватории определяют высокий общий продукционный потенциал озера и его долгопериодную цикличность. Прибрежная мелководная зона отличается меньшим вкладом в суммарные биопродукционные показатели. Формирование промысловых запасов происходит за счет видов трех экологических групп рыб: обитающих в основном в открытой акватории (озерные), связанных преимущественно с прибрежной зоной (прибрежные) и озерно-речных [Ладога..., 2013].

Среди факторов снижения объемов экосистемной услуги, связанной с рыболовством, можно выделить следующие. Это недоста-

точное использование по организационным и экономическим причинам рыбопродукционного потенциала многочисленных популяций (ряпушка, корюшка, мелкий частик). Вследствие многофакторного антропогенного воздействия происходит уменьшение промысловых запасов крупночастиковых ценных рыб (озерные сига, судак, лещ, щука). Кроме того, потеряли промысловое значение рыбы, чувствительные к условиям обитания, ставшие редкими, включенными в Красные книги (озерный лосось, озерная форель, озерно-речные сига).

Стоимостная оценка промышленной добычи как компонента продукционной услуги оказалась сложной задачей, несмотря на возможность применения в расчетах рыночного подхода. Для экономически адекватной оценки необходимо учитывать тренд общих уловов, изменение их структуры и рыночных цен, трудности реализации рыбной продукции из-за экономических преобразований и организационных реформ в отрасли, а также неполное использование имеющихся запасов. Затрудняет стоимостную оценку неполное отражение уловов в официальной статистике, а также рост теневого сектора в рыболовстве. Непросто оценить вклад любительского рыболовства в экономические показатели рассматриваемой продукционной услуги. По экспертной оценке, выполненной ФГБНУ ВНИРО (2021 г.), общий браконьерский улов составляет более 50 % от улова промысловиков. В то же время любительское и спортивное рыболовство по лицензиям не получило должного развития. Вместе с тем есть данные по оценке так называемого рекреационного рыболовства в целом для Ленинградской области, включая Санкт-Петербург, в сумме 49 млрд рублей [Ситкина, 2017].

Уменьшение экономической ценности рыбных запасов включает не только их общее снижение, но и выпадение из промысла рыб, занесенных в Красную книгу, а также отличающихся благодаря своим качествам высокой рыночной стоимостью. Последнее определяет политику восстановления ценных популяций рыб, их рыбопромыслового значения, что требует искусственного воспроизводства. Дискуссионным остается вопрос учета выращивания рыб в экосистемной услуге, связанной с рыбопродуктивностью озера. Напомним, что это компенсационное восстановление биоресурсов основано на изъятии производителей из исчезающих популяций ценных рыб, дорогостоящих технологиях их выращивания, наряду с низкой конечной эффективностью работ, проводимых с 1930-х годов Волховским и Свирским рыбноводными заводами.

Следует отметить, что в настоящее время к традиционному промысловому и любительскому рыболовству добавилось производство аквакультуры. При этом доход получают различные экономические агенты, что осложняет расчеты стоимости услуги озера по обеспечению населения продовольствием, а также внедрение платежей за данную экосистемную услугу. Несмотря на это, часть производственной услуги, связанной с развитием аквакультуры на Ладожском озере, удалось рассчитать.

Для стоимостной оценки аквакультуры были использованы данные открытой финансовой отчетности семнадцати рыболовных хозяйств, расположенных на озере. На основе информации о платежах в фонд социального страхования и среднесписочной численности этих предприятий вычислен размер средней заработной платы – 31,2 тыс. рублей в месяц. Общий доход работников, занятых на фермах, составляет, таким образом, около 120 млн рублей в год, а доходы бюджета от налогов – 11 млн рублей в год. Получение дополнительной продукции за счет выращивания рыб расценивается как компенсационный механизм в условиях подрыва естественных рыбных запасов. Однако развитие аквакультуры сопровождается экологическими рисками, связанными с ухудшением качества воды, возникновением эпизоотий, созданием угроз биоразнообразию [Болотова, 2017б].

Характеристика условий развития транспортных услуг и оценка их стоимости в Ладожском озере

Ладожское озеро служит звеном Волго-Балтийского пути, услугами которого пользуется не менее 150 судоходных компаний. Создание данной транзитной транспортной услуги сыграло важнейшую роль в экономическом развитии региона и развитии туристических услуг. Привлекательна сама трасса Волго-Балтийского пути, проходящая по великому озеру, и маршрут по ней, как части сложной природно-технической системы, а также культурно-исторический аспект его сооружения. Известна популярность речных круизов по Волго-Балтийскому водному пути, включающему крупнейший туристский центр Санкт-Петербург.

Наряду с получаемыми выгодами функционирование Волго-Балтийской магистрали сопровождается комплексом техногенных и экологических рисков [Болотова, 2017а]. Увеличение эксплуатации озера в транспортных целях уменьшает соответственно возможность использования других услуг, предоставляемых

экосистемой. Так, напряженные грузопассажирские перевозки проходят по южной части Ладожского озера, где фиксируется высокий уровень загрязнения воды [Алхименко, 2005; Румянцев, Кудерский, 2010; Поздняков и др., 2021] и создается зона «конфликта интересов» природопользователей.

Учитывая значимость использования Ладожского озера в составе Волго-Балтийского водного пути, были рассчитаны выгоды, получаемые логистическими компаниями. По данным интернет-портала «Ладога» [Транспорт ..., 2020], длина трассы в Ладожском озере составляет 1171 км, подходы к причалам, пристаням, остановочным пунктам – еще 1142 км. За период навигации 2021 года по судоходным путям Волго-Балтийского канала пропущено более 19,5 тыс. судов и общий грузопоток составил 16,7 млн тонн [Навигация..., 2021]. При этом на долю Ладожского озера приходится около половины проходящего через водный путь грузооборота – общий объем перевозок составляет около 8 млн тонн в год [Транспорт ..., 2020]. Кроме того, по Ладожскому озеру ежегодно перевозится около 77 тыс. пассажиров. Помимо судов, осуществляющих перевозку грузов и пассажиров, в акватории озера используют рыболовецкие суда, их количество достигает 60 единиц суммарным водоизмещением 13,5 тыс. тонн [Транспорт ..., 2020].

Для оценки стоимости транзитной транспортной услуги выявили расходы, которые несут пользователи водных путей на поддержание инфраструктуры, для сопоставления с аналогичными расходами для наземного транспорта. Согласно раскрытой информации ФБУ «Администрация «Волго-Балт», в 2021 году на обеспечение безопасности и функционирования транспортной инфраструктуры канала потрачено 342 млн рублей, что составляет примерно 20,5 рубля на тонну прошедшего по каналу груза. Принимая во внимание общую протяженность водных путей Волго-Балтийского бассейна в 4944,2 км, из которых средствами навигационного оборудования обслуживается 3,5 тыс. км, получаем ничтожно малую стоимость инфраструктурного обслуживания – 0,6 копейки за тонну на километр.

Для сравнения определили стоимость содержания автомобильной инфраструктуры в России. По данным статистического ежегодника [Транспорт..., 2020], в стране в 2019 году насчитывалось 1 706 тыс. км автомобильных дорог. По ним в коммерческих целях перевезено 5 735 млн тонн грузов. При этом стоимость содержания одного километра автодороги составляет 511,26 руб. (данные Доклада о

стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, ремонта и содержания 1 км автомобильных дорог общего пользования Российской Федерации за 2020 год). Таким образом установили, что стоимость провоза одной тонны на один километр автомобильным транспортом требует инфраструктурных расходов в 15 копеек. Это в 25 раз больше, чем цена эксплуатации водных транспортных путей. Принимая во внимание экономию в 14,4 копейки с тонны на километр и исходя из указанных выше объемов перевозок, получаем стоимость транзитной транспортной услуги озера в 2,6 млрд рублей. Расчет перевозки пассажиров на круизном судне из расчета не менее 8 тонн водоизмещения на пассажира дает общую стоимость 205 млн рублей без учета других преимуществ водного транспорта (связанных с комфортом передвижения). Суммарная стоимость транзитной транспортной услуги оценивается 2 805 миллионов рублей.

В Ладожском озере наряду с транзитным осуществляется интенсивное местное судоходство с грузонапряженностью примерно 550 т/км². Общая протяженность судоходных линий в озере составляет около 1500 км плотностью 0,1 км/км² акватории. Наличие многочисленных гаваней также способствует развитию внутреннего судоходства, включая маломерный флот, используемый в рекреационных целях. Ограничительным фактором для судоходства служат такие природные условия, как активная динамика водных масс, особенности ветровой обстановки и сильные шторма.

Как пример экономической оценки внутреннего судоходства на Ладожском озере была рассчитана стоимость транспортной услуги для рыболовного флота. Рассчитанная сумма составила 10,4 млн рублей/год, с учетом усредненных показателей 45 выходов каждого судна за сезон и дистанцией 120 км.

Таким образом, к составляющим транспортной услуги относятся трасса Волго-Балтийского пути и внутренние маршруты. Общая сумма транспортных услуг составила 2 815,4 млн рублей как ориентировочная величина, основанная на экономическом эквиваленте, связанном с преимуществами водного пути.

Следует подчеркнуть, что приносящие доход транспортные услуги зависят от средообразующей услуги, предоставляемой Ладожским озером, для которой их функционирование имеет негативные последствия. Это ставит вопрос о компенсационных платежах, связанных со снижением ценности средообразующей услуги (например, ухудшением качества воды). Плательщиками должны быть получатели вы-

год от функционирования транспортного пути, а получателями платежей – природоохранные структуры (например, ООПТ), научные учреждения, исследующие экосистемы, и местное население, субсидии которому могут стимулировать отказ от деятельности, усиливающей антропогенную нагрузку на озеро, и др. Можно рассматривать данный подход как один из механизмов финансирования природоохранных проектов и эко-компенсационных программ поддержания устойчивого состояния экосистемы Ладожского озера.

Положительным моментом развития транспортных услуг является вклад в реализацию других экосистемных услуг: производственных (промысловое и любительское рыболовство), рекреационных (туризм, спорт, отдых), духовно-эстетических (паломнический туризм), информационных (исследовательские рейсы, образовательный туризм).

Анализ туристско-рекреационного потенциала Ладожского озера и оценка туристической услуги о. Валаам

Ладожское озеро обладает обширнейшим туристско-рекреационным потенциалом, способствующим развитию водопользования [Ладожское..., 2015]. С богатыми водными и биологическими ресурсами связано развитие водных туров и любительское рыболовство, использующее производственную услугу озера. Привлекательность этого традиционного занятия определяется разнообразием ихтиофауны, включающей редкие и ценные виды рыб. Уникальное биоразнообразие Ладожского озера дополняется другими видами гидробионтов, являющимися реликтами ледниковой эпохи [Ладога..., 2013], что может стимулировать развитие образовательно-научного, познавательного и экологического направления туризма.

С выгодным географическим положением Ладожского озера и его водосборного бассейна связано давнее освоение края, о чем свидетельствуют множество археологических памятников, привлекающих в настоящее время внимание в рамках развития познавательного и научного туризма. Включение озера в состав сети древних волоковых путей, в том числе в знаменитый торговый путь «из варяг в греки», а затем в построенные магистральные транспортные пути определили обширное историческое и культурное наследие территории. В туристические маршруты включены многочисленные памятники истории и культуры федерального, регионального и местного значения. Привлекательность этих маршрутов связана с информационными услу-

гами как отражением определенных исторических эпох и разных периодов хозяйственной и культурной деятельности человека в конкретных ландшафтных условиях.

Значительный вклад в привлекательность для туристско-рекреационного освоения Ладожского озера вносит его средообразующая функция при наличии комплекса своеобразных природных объектов, связанных со спецификой формирования самого водоема. Так, к наследию сложного генезиса озера при отступлении береговой линии в постледниковый период относятся часть природных памятников: террасы, береговые валы, дюны. Геоморфологической достопримечательностью служат валунные моренные гряды, песчаные отмели, живописные шхеры и многочисленные острова.

Посещение некоторых островов связано с использованием не только транспортной и информационной услуги (познавательный туризм), но и духовно-эстетической, учитывая красоту пейзажей и объекты религиозного наследия. Наиболее известный объект синергии природных и духовных ценностей – остров Валаам, который с 1960-х годов включен в туристические маршруты.

Эта популярная достопримечательность Ладожского озера была выбрана для расчета стоимости туристических услуг из-за высокой посещаемости острова. Ежегодное число посетителей о. Валаам составляет примерно 100 тысяч [Ладожское..., 2015]. Для оценки стоимости туристических услуг, предоставляемых островом, потребовалось определить показатель дохода туристического бизнеса от одного туриста. Для этого использовали данные статистического бюллетеня Росстата по общей численности клиентов (52 997 тыс. чел. в 2021 г.) в коллективных средствах размещения. Также выявили, что объем услуг туристических агентств, туроператоров и прочих услуг по бронированию составил примерно 102 млрд рублей в целом по России. Таким образом, выручка бизнеса от одного туриста составляет в среднем 1 935,6 рубля. Аналогичным способом по данным Росстата 2021 года посчитали доход гостиниц и сервисов по предоставлению временного жилья (250,4 млрд рублей). В среднем сумма выручки за счет одного туриста составляет 4 751,7 рубля. Соответственно, общий доход туристического бизнеса и гостиниц от одного туриста Валаама: 1935,6 руб. + 4751,7 руб. = 6687,3 руб. При ежегодном числе посетителей острова 100 тыс. человек объем выручки составляет 668,3 млн руб. год. Следует также отметить, что очень часто туристы, следующие по Волго-Балтийскому каналу, покупа-

ют комплексный тур с заездом на Валаам. При этом они обеспечивают выручку агентствам по бронированию и обслуживанию таких туров без участия гостиничного бизнеса острова. Число круизных туристов ежегодно составляет около 77 тысяч человек [Транспорт ..., 2020], которые при посещении острова приносят следующий доход: 1935,6 руб. × 77 000 чел. = 149,0 млн руб. В результате общий доход, который генерируют туристическим агентствам и гостиницам посетители острова Валаам, составляет 668,3 + 149,0 = 817,3 млн руб./год.

Очевидно, что полученную стоимость туристических услуг в год можно считать заниженной, так как она не отражает всего туристического потока, в том числе различного рода однодневных визитов на о. Валаам – как с другими экскурсионными группами, так и самостоятельных.

В развитие рекреационно-туристических услуг немалую долю вносят 17 ООПТ Приладожья, включая государственный природный биосферный заповедник, природный парк, водно-болотное угодье, дендрологический парк и 13 заказников. Также в сеть ООПТ входят 30 памятников природы [Ладожское..., 2015]. Площадь ООПТ, прилегающих к Ладожскому озеру, составляет около 2 тыс. км² (200 000 га).

Для анализа экономической ценности ООПТ использовали несколько подходов. Экономическая ценность земель этих ООПТ может быть определена через стоимость ландшафтов, для которых в литературе имеются усредненные данные глобальных оценок в долларах США/га. Если использовать рассчитанную стоимость одного гектара земли для «зоны бореальных лесов» 3013 \$ [Costanza et al., 2014] для общей площади ООПТ Приладожья, равной 200 000 га, то получаем стоимость земель 602,6 млн долларов. При текущем курсе доллара 63 рубля получим следующий расчет стоимости земель ООПТ: 3013 \$ × 200 000 га × 63 руб. = 37,9 млрд руб.

При использовании другого подхода, связанного с расчетом рефугиумной функции территорий, стоимость которых оценивается для территорий с редкими, исчезающими и эндемичными сообществами и экосистемами, усредненные данные глобальных оценок будут составлять 1,52 долл. США/га [De Groot et al., 2012]. Умножая эту стоимость на общую площадь ООПТ Приладожья и текущий курс доллара, получаем следующую сумму: 1,52 \$ × 200 000 га × 63 руб. = 19,2 млн руб. Аналогичные расчеты выполнены для всей Ленинградской области, и стоимость рефугиумной функции составила 62,3 млн рублей

[Кулаковская, Санин, 2021]. Это позволяет сделать вывод о высокой экономической ценности ООПТ Приладожья, стоимость рефугиумной функции которых составляет 30,8 % от общей для Ленинградской области.

Применение показателя удельной стоимостной оценки экосистемных услуг природных ландшафтов [Пятый..., 2015] с использованием среднего для России современного дохода от рекреационной деятельности на ООПТ, который составляет 55–65 руб. на 1 га/в год, получаем следующую ориентировочную сумму: 65 руб. × 200 000 га = 13 млн руб./год.

По данным этого же источника, информационные услуги как некоммерческое использование ООПТ позволяют получить выгоду 90–100 руб. на 1 га/год. Исходя из этой суммы провели расчет потенциальной стоимости информационных услуг ООПТ Приладожья: 100 руб. × 200 000 га = 20 млн руб./год.

Общая сумма стоимости рекреационных и информационных экосистемных услуг ООПТ Приладожья, рассчитанная методом переноса усредненной стоимости ООПТ России, составляет 33 млн руб./год. При учете стоимости рефугиумной функции, сохраняющей биоразнообразие ООПТ и оцененной в 19,2 млн рублей, общая сумма будет равняться 55,2 млн рублей. Эта величина отражает приблизительную стоимость только трех компонентов экосистемных услуг ООПТ, и есть основания считать ее значительно заниженной. Первоочередной задачей служит оценка роли ООПТ в снижении поступления биогенов с неиспользуемых в хозяйственной деятельности земель в Ладожское озеро. Эффективность такого компенсационного механизма (non-use value) доказана в мировой практике управления процессом эвтрофирования водоемов.

Следует подчеркнуть, что экономическая оценка ООПТ является непростой задачей, учитывая многофункциональность этих территорий, обеспечивающих средообразующие экосистемные услуги и сохранение биоразнообразия, а также богатый информационный и духовно-эстетический потенциал, не имеющий отражения в рыночных ценах. В то же время исследованиями показана перспективность оценки экосистемных услуг ООПТ на основе применения концепции общей экономической ценности [Завадская и др., 2017].

Экосистемные услуги территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга оцениваются в 64,5 млрд рублей для рекреационных услуг, а туристических – в 38,8 млрд рублей [Ситкина, 2017]. В других исследованиях территории Ленинградской области стоимость

рекреационных услуг оценивается в диапазоне 50–150 млрд рублей наряду с оценкой в 1,87 млрд рублей [Кулаковская Санин, 2021].

Большие разночтения в оценке стоимости, особенно рекреационных услуг, вызваны применением разной классификации экосистемных услуг, когда в их категории включаются разные компоненты, а также отличаются подходы и методы оценок.

Заключение

Рассмотрение состояния природных ресурсов Ладожского озера с точки зрения условий и факторов формирования экосистемных услуг позволило провести их идентификацию и выделить продукционные, средообразующие, информационные, духовно-эстетические и рекреационные услуги, требующие экономической оценки. Установлено снижение качества средообразующих и продукционных услуг, индикатором потери которых является ухудшение качества воды в литоральной зоне, уменьшающее выгоду водопотребления и водопользования. Происходит сокращение продовольственных услуг Ладожского озера при снижении качества и количества рыбных ресурсов, что обусловлено ухудшением условий среды обитания и сокращением биоразнообразия рыб.

В рамках экономической ценности природного капитала Ладожского озера потенциальные экосистемные услуги эквивалентны сумме около 1,6 триллиона рублей, потенциальная стоимость воды – 690 млрд рублей, потенциальная стоимость экосистемных услуг земель ООПТ Приладожья – 37,9 млрд руб. Стоимость рекреационных и информационных услуг ООПТ, а также рефугиумной функции, сохраняющей биоразнообразие Приладожья, составила 55,2 млн руб./год. Общая стоимость некоторых уже реализуемых компонентов экосистемных услуг Ладожского озера достигает 4166,7 млн руб./год, включая потребление питьевой воды, развитие аквакультуры, туристические (о. Ваалаам) и транспортные услуги. Наибольшие доходы от средообразующей услуги Ладожского озера получает Волго-Балтийский транспортный путь (2 805 млн руб./год), но его функционирование сопровождается ухудшением качества воды в южной части озера. Выявление выгодополучателей этой транзитной транспортной услуги и разработка схем компенсационных платежей является одним из механизмов получения альтернативных ресурсов финансирования природоохранных проектов в целях поддержания устойчивого состояния экосистемы Ладожского озера.

Литература

Алхименко А. П. Транспортно-экологические проблемы водной системы «Ладожское озеро – река Нева – Финский залив» // Региональная экология. 2005. № 1–2(24). С. 109–119.

Алхименко А. П., Цветков В. Ю. Рекреационные ресурсы Ладожского озера // Геоэкологические проблемы Ладожского озера: Сб. науч. тр. СПб.: Прикладная экология, 2010. С. 15–45.

Бобылев С. Н., Касьянов П. В., Соловьева С. В., Стеценко А. В. Комплексная экономическая оценка лососевых Камчатки. М.: Права человека, 2008. 64 с.

Болотова Н. Л. Волго-Балтийский водный путь: экологические риски строительства и эксплуатации на примере территории Вологодской области // Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей: Мат-лы междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2017а. С. 164–176.

Болотова Н. Л. О применении концепции экосистемных услуг к водным экосистемам // Ученые записки РГГУ. 2017б. № 49. С. 114–133.

Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 255 с.

Дятлов М. А. Рыбы Ладожского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 281 с.

Завадская А. В., Николаева Е. А., Сажина В. А., Шпиленок Т. И., Шувалова О. А. Экономическая оценка природных ресурсов и экосистемных услуг Кроноцкого заповедника и Южно-Камчатского заказника / Ред. С. Н. Бобылев. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2017. 244 с.

Кондратьев С. А., Поздняков Ш. Р. Гидрофизическое обоснование выбора расположения водозабора на акватории крупного водоема (на примере Ладожского озера) // Чистая вода. Проблемы и решения. 2012. № 1–2. С. 84–87.

Кулаковская В. А., Санин А. Н. К вопросу об экономической оценке экосистемных услуг, оказываемых геосистемами прибрежной зоны Балтийского моря // Государственное управление. Электронный вестник. 2021. № 86. С. 115–137. doi: 10.24412/2070-1381-2021-86-115-140

Курашов Е. А., Барбашова М. А., Дудакова Д. С., Капустина Л. Л., Митрукова Г. Г., Русанов А. Г., Алешина Д. Г., Иофина И. В., Протопопова Е. В., Родионова Н. В., Трифонова М. С. Экосистема Ладожского озера: современное состояние и тенденции ее изменения в конце XX – начале XXI в. // Биосфера. 2018. Т. 10, № 2. С. 66–121. doi: 10.24855/biosfera.v10i2.439

Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013. 467 с.

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.

Литоральная зона Ладожского озера / Ред. Е. А. Курашов. СПб.: Нестор-История, 2011. 416 с.

Навигация по Волго-Балту прошла без рекордов // Деловой Петербург [Электронный ресурс]. URL: https://www.dp.ru/a/2021/12/10/Navigacija_proshla_bez_re (дата обращения: 16.05.2022).

Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 19.07.2000 N 166-ФЗ (ред. от 20.07.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2021) // Российская газета. 05.08.2000. № 117.

Поздняков Ш. Р., Кондратьев С. А., Расулова А. М., Коробченкова К. Д. Ладожское озеро – геостратегический водный объект Северо-Запада России и его зоны экологического риска // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 139–161. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161

Пятый национальный доклад «Сохранение биоразнообразия в Российской Федерации». М.: Минприроды РФ, 2015. 124 с.

Розенберг А. Г. Природный капитал и экосистемные услуги региона. Тольятти: Кассандра, 2015. 84 с.

Румянцев В. А., Алхименко А. П., Кудерский Л. А., Соболев И. А. Концепция и проект федерального закона «Об охране Ладожского озера». СПб.: ИНОЗ РАН, 2008. 109 с.

Румянцев В. А., Кудерский Л. А. Ладожское озеро: общая характеристика, экологическое состояние // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2010. № 1. С. 171–182.

Ситкина К. С. Экосистемные услуги регионов России // Allbest: выбери лучшее [Электронный ресурс]. 21.07.2017 URL: https://revolution.allbest.ru/ecology/00814535_0.html (дата обращения: 15.05.2022).

Статистический бюллетень Росстата к Всемирному дню туризма. 2021. 21 с.

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Ред. С. А. Кондратьев [и др.]. М.: РАН, 2021. 637 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3

Тихонова Т. В. Экосистемные услуги: пути практического использования // Проблемы развития территории. 2019. № 1(99). С. 25–39. doi: 10.15838/ptd.2019.1.99.2

Тишков А. А. Биосферные функции природных экосистем России. М.: Наука, 2005. 309 с.

Транспорт / Ладога [Электронный ресурс]. URL: <http://ladoga.krc.karelia.ru/economy/transport/index.ru.shtml> (дата обращения: 15.05.2022).

Транспорт в России. 2020: Статистический сборник. Росстат, 2020. 108 с.

Филатов Н. Н. Нужен ли закон об охране Ладожского и Онежского озер? // Вода Magazine. № 7(119). 2017. С. 30–35.

Фоменко Г. А., Фоменко М. А., Лошадкин К. А., Михайлова А. М. Денежная оценка природных ресурсов, объектов и экосистемных услуг в управлении сохранением биоразнообразия: опыт региональных работ. Ярославль: Кадастр, 2002. 80 с.

Цифры и факты / ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» [Электронный ресурс]. URL: http://www.vodokanal.spb.ru/o_kompanii/cifry_i_fakty (дата обращения: 03.05.2022).

De Groot R., Brander L., Van der Ploeg S., Costanza R., Bernard F., Braat L., Christie M., Crossman N., Ghermandi A., Hein L., Hussain S., Kumar P., McVitie A., Portela R., Rodriguez L.C., ten Brink P., van Beukering P. Global estimates of the value of ecosystems and

their services in monetary units // *Ecosystem Services*. 2012. Vol. 1, iss. 1. P. 50–61. doi: 10.1016/j.ecoser.2012.07.005

Costanza R., de Groot R., Sutton P., van der Ploeg S., Anderson S. J., Kubiszewski I., Farer S., Turner R. K. Changes in the global value of ecosystem services // *Global Environmental Change*. 2014. Vol. 26. P. 152–158. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

References

Alkhimenko A. P. Transport and environmental problems of the water system Lake Ladoga - Neva River - Gulf of Finland. *Regional Ecology*. 2005;1–2(24):109–119. (In Russ.)

Alkhimenko A. P., Tsvetkov V. Yu. Recreational resources of Lake Ladoga. *Geoecological problems of Lake Ladoga*. St. Petersburg: Applied Ecology; 2010. P. 15–45. (In Russ.)

Bobylev S. N., Kasyanov P. V., Solovieva S. V., Ste-tsenko A. V. Integrated economic assessment of salmonids of Kamchatka. Moscow: Prava cheloveka; 2008. 64 p. (In Russ.)

Bolotova N. L. Volga-Baltic waterway: environmental risks of construction and operation on the example of the territory of the Vologda region. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii vodnykh putei – Design, construction, and operation of hydraulic structures of waterways*. 2017a. P. 164–176. (In Russ.)

Bolotova N. L. On the application of the concept of ecosystem services to aquatic ecosystems. *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2017;49:114–133. (In Russ.)

Costanza R., de Groot R., Sutton P., van der Ploeg S., Anderson S. J., Kubiszewski I., Farer S., Turner R. K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*. 2014;26:152–158. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002

De Groot R., Brander L., Van der Ploeg S., Costanza R., Bernard F., Braat L., Christie M., Crossman N., Ghermandi A., Hein L., Hussain S., Kumar P., McVitie A., Portela R., Rodriguez L.C., ten Brink P., van Beukering P. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*. 2012;1(1):50–61. doi: 10.1016/j.ecoser.2012.07.005

Dyatlov M. A. Fish of Lake Ladoga. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2002. 281 p. (In Russ.)

Fifth national report *Biodiversity conservation in the Russian Federation*. Moscow: Minprirody RF; 2015. 124 p. (In Russ.)

Figures and facts. *GUP «Vodokanal Sankt-Peterburga» – SUE Vodokanal of St. Petersburg*. URL: http://www.vodokanal.spb.ru/o_kompanii/cifry_i_fakty (accessed: 03.05.2022).

Filatov N. N. Do we need a law on the protection of Lakes Ladoga and Onega? *Voda Magazine – Water Magazine*. 2017;7(119):30–35. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). *Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 255 p. (In Russ.)

Fomenko G. A., Fomenko M. A., Loshadkin K. A., Mikhailova A. M. Monetary assessment of natural resources, objects and ecosystem services in biodiversity conservation management: Experience of regional works. Yaroslavl': Kadastr; 2002. 80 p. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A. et al. (eds.) *Current state and problems of man-induced transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate*. Moscow: RAN; 2021. 637 p. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3 (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Pozdnyakov Sh. R. Hydrophysical rationale for choosing the location of a water intake in the water area of a large reservoir (on the example of Lake Ladoga). *Chistaya voda. Problemy i resheniya – Clean Water. Problems and Solutions*. 2012;1-2:84–87. (In Russ.)

Kulakovskaya V. A., Sanin A. N. On the issue of economic assessment of ecosystem services provided by geosystems of the coastal zone of the Baltic Sea. *State Administration. Electronic Bulletin*. 2021;86:115–137. doi: 10.24412/2070-1381-2021-86-115-140 (In Russ.)

Kurashov E. A., Barbashova M. A., Dudakova D. S., Kapustina L. L., Mitrukova G. G., Rusanov A. G., Aleshina D. G., Iofina I. V., Protopopova E. V., Rodionova N. V., Trifonova M. S. Ecosystem of Lake Ladoga: current state and trends of its change in the late XX – early XXI century. *Biosphere*. 2018;10(2):66–121. doi: 10.24855/biosphere.v10i2.439 (In Russ.)

Kurashov E. A. (ed.). *Littoral zone of Lake Ladoga*. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2011. 416 p. (In Russ.)

Navigation along the Volga-Baltic Waterway didn't set records. *Деловой Петербург – Business Petersburg*. URL: https://www.dp.ru/a/2021/12/10/Navigacija_proshla_bez_re (accessed: 16.05.2022). (In Russ.)

Pozdnyakov Sh. R., Kondratiev S. A., Rasulova A. M., Korobchenkova K. D. Lake Ladoga is a geostrategic water body of the North-West of Russia and its environmental risk zones. *Hydrometeorology and Ecology*. 2021;62:139–161. doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-139-161 (In Russ.)

Rozenberg A. G. Natural capital and ecosystem services of the region. Tolyatti: Cassandra; 2015. 84 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A. (ed.). *Lake Ladoga and sights of its coast*. Atlas. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2015. 200 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Alkhimenko A. P., Kudersky L. A., Sobol I. A. Concept and draft federal law *On the protection of Lake Ladoga*. St. Petersburg: INOZ RAN; 2008. 109 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kondratiev S. A. (eds.). *Ladoga*. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2013. 467 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kudersky L. A. Lake Ladoga: general description, ecological state. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana) = Society. Environment. Development (Terra Humana)*. 2010;1:171–182. (In Russ.)

Sitkina K. S. Ecosystem services of Russian regions. *Allbest: choose the best*. URL: https://revolution.allbest.ru/ecology/00814535_0.html (accessed: 15.05.2022). (In Russ.)

Statistical Bulletin of the Rosstat for the World Tourism Day. 2021. 21 p.

Tax Code of the Russian Federation (part two) dated July 19, 2000 N 166-FZ (as amended on July 20, 2021) (as amended and supplemented, effective from October 1, 2021). *Rossiyskaya Gazeta*. 2000; 117. (In Russ.)

Tikhonova T. V. Ecosystem services: ways of practical use. *Problemy razvitiya territorii = Problems of Territory Development*. 2019;1(99):25–39. doi: 10.15838/ptd.2019.1.99.2 (In Russ.)

Tishkov A. A. Biospheric functions of natural ecosystems in Russia. Moscow: Nauka; 2005. 309 p. (In Russ.)

Transport. Ladoga. URL: <http://ladoga.krc.karelia.ru/economy/transport/index.ru.shtml> (accessed: 15.05.2022). (In Russ.)

Transport in Russia. 2020: The statistical compendium. Rosstat; 2020. 108 p. (In Russ.)

Zavadskaya A. V., Nikolaeva E. A., Sazhina V. A., Shpilenok T. I., Shuvalova O. A. Economic valuation of natural resources and ecosystem services of the Kronotsky Reserve and the South Kamchatka Reserve. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress; 2017. 244 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 14.06.2022; принята к публикации / accepted: 26.07.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Болотова Наталья Львовна

д-р биол. наук, профессор кафедры биологии и химии

e-mail: bolotova.vologda@mail.ru

Мухин Иван Андреевич

канд. биол. наук, доцент кафедры биологии и химии

e-mail: ivmukhin@mail.ru

Лопичева Ольга Георгиевна

старший преподаватель кафедры биологии и химии

e-mail: lopichevaog@vogu35.ru

CONTRIBUTORS:

Bolotova, Natalya

Dr. Sci. (Biol.), Professor, Biology and Chemistry Department

Mukhin, Ivan

Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor,
Biology and Chemistry Department

Lopicheva, Olga

Senior Lecturer, Biology and Chemistry Department

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С УЧАСТИЕМ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СТРАН СНГ «ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕСУРСОВ, ЭКОСИСТЕМ ОЗЕР И МОРЕЙ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА И СОЦИО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ» (Петрозаводск, 12–14 сентября 2022 г.)

Научное мероприятие было организовано Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) и проходило на базе Карельского научного центра РАН. Оргкомитет конференции, включавший также коллег из ИНОЗ РАН, ЛИН СО РАН, ЗИН РАН и др., решил провести настоящее мероприятие несмотря на отсутствие финансовой поддержки, учитывая актуальность изучения состояния и изменений озер, имеющих огромное научное и прикладное значение в связи с водоснабжением, энергетикой, водным транспортом и рекреацией. Важность тематики конференции обусловлена тем, что, несмотря на предпринятые в последние четыре десятилетия практические меры по охране и восстановлению экосистем крупных водоемов мира (1500 площадью 100 км²), до сих пор состояние многих озер не только существенно не улучшается, но наблюдается даже деградация их экосистем.

На конференции были представлены доклады по следующим основным направлениям:

- Современные опасности, угрозы пресноводным экосистемам.
- Эвтрофикация озер: прогнозная оценка взаимосвязей качества воды и водных сообществ.
- Разномасштабные биологические инвазии в водоемы Евразии.
- Ретроспективная оценка биогеохимической динамики в экосистемах озер: моделирование и эксперименты.
- Социально-эколого-экономические аспекты поддержки политики управления большими

озерами: опыт по совершенствованию политики сохранения и восстановления озер.

В работе конференции в очно-дистанционном режиме приняли участие научные сотрудники из 52 организаций, включая научные институты и высшие учебные заведения Москвы, Санкт-Петербурга, Мурманска, Севастополя, Калининграда, Новосибирска, Казани, Апатитов, Тольятти, Вологды, Петрозаводска, а также стран СНГ (Узбекистан, Таджикистан, Абхазия). Общее число зарегистрированных на сайте конференции участников составило около 150 человек.

Открывал мероприятие председатель Оргкомитета чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов. С приветственным словом к участникам обратились генеральный директор КарНЦ РАН чл.-корр. РАН О. Н. Бахмет и депутат Государственной думы РФ В. Н. Пивненко.

Работа конференции проходила в несколько этапов. В связи с актуальностью тематики и с учетом широкого географического представительства участников пленарным докладам был полностью посвящен первый день конференции, 12 сентября. В результате анализа присланных на регистрацию заявок Оргкомитет сформировал пять секций: 1. Современное состояние, опасности и угрозы пресноводным экосистемам (микро/нанопластик, массовое развитие цианобактерий, спиригира, аквакультура, закисление); 2. Экологическая оценка взаимосвязей качества воды и водных сообществ; 3. Процессы формирования и преобразования

донных отложений озерно-речных и морских систем в условиях изменений климата и антропогенного воздействия; 4. Современные методы измерений и моделирование гидрофизических процессов в условиях ускоряющегося изменения абиотических факторов водных экосистем; 5. Термогидродинамические и биогеохимические процессы в море и прибрежной зоне. Дополнительно была организована секция 6 «Наука – образованию» с лекциями для студентов Петрозаводского государственного университета. Работа секций велась во второй день конференции на пяти независимых площадках в структурных подразделениях КарНЦ РАН в очно-дистанционном режиме.

На пленарной сессии (председатель чл.-корр. РАН Н. Н. Филатов, зам. председателя д.ф.-м.н. С. А. Кондратьев) представлено 13 докладов (из них 8 очных и 5 онлайн) о состоянии и изменениях внутренних водоемов Евразии: Белого, Балтийского, Черного и Аральского морей, а также побережья Мурман, Баренцева моря, крупных озер Евразии: Байкала, Ладожского, Онежского, озер Татарстана, Рыбинского водохранилища.

Рассматривались такие важные проблемы, как современные опасности, угрозы пресноводным экосистемам (микро/нанопластик, массовое развитие цианобактерий, спиригира, аквакультура и др.); продолжающаяся эвтрофикация озер; вопросы взаимосвязей качества воды и водных сообществ; роль биологических инвазий в водоемы Евразии; оценка биогеохимической динамики в экосистемах озер: моделирование и эксперименты, а также социально-эколого-экономические аспекты поддержки политики управления большими озерами: опыт по совершенствованию политики сохранения и восстановления внутренних водоемов.

Особое внимание уделено социо-эколого-экономическим проблемам Белого моря и водосбора с предложением современных разработок по изучению этой сложной системы с использованием когнитивных моделей. Обсуждались актуальные проблемы разработки современного мониторинга водных систем, предложена новая концепция комплексного мониторинга на примере Рыбинского водохранилища, обсуждались вопросы правового регулирования использования и охраны водных ресурсов и экосистем озер, рассматривались проблемы возможного будущего Аральского моря и предлагались оригинальные решения, представлено сообщение о радиозэкологическом состоянии окружающей среды в прибрежье Мурман.

Продолжающееся ухудшение состояния озер обусловлено увеличением населения Земли, антропогенным влиянием, потеплением климата, вторичным загрязнением, поэтому требуется незамедлительно уделить существенно большее, чем сейчас, внимание решению проблем управления и охраны экосистем крупных озер, развитию сети наблюдений, мониторинга, совершенствованию законодательства в области охраны водных ресурсов. Не вызывает сомнения необходимость интенсификации научных исследований водоемов в России с целью создания интегрированных систем управления, обеспечивающих информационную поддержку органов, принимающих практические решения. Из-за отсутствия таких систем или недостаточной их разработанности управленческие решения в РФ по использованию ресурсов, сохранению или восстановлению озер и их экосистем зачастую принимаются без соответствующего научного обоснования. В целом для крупнейших озер России отмечается недостаток количественного описания сложных экосистемных взаимодействий, что не позволяет не только достоверно различать естественные климатические и антропогенные социо-экономические причины изменений, но и прогнозировать возможную динамику экосистем с указанием степени неопределенности прогнозов. В число таких прогнозов могут, например, входить прогноз изменений гидрологического режима, трофического статуса и биоресурсной деятельности.

В ходе работы секции 1 «Современное состояние, опасности и угрозы пресноводным экосистемам (микро/нанопластик, массовое развитие цианобактерий, спиригира, аквакультура, закисление» (председатель к.т.н. М. Б. Зобков) в 19 устных и 7 стендовых докладах показано, что в настоящее время пресноводные экосистемы повсеместно подвергаются различным угрозам в результате антропогенного воздействия – загрязнения вод химическими веществами, частицами полимеров, повышения содержания биогенных элементов, которое в свою очередь приводит к эвтрофированию вод, учащению случаев залпового цветения, развитию цианобактерий и инвазивных видов водорослей. В нескольких сообщениях указывается, что развитие цианобактерий, вызванное антропогенным эвтрофированием, привело к повышению концентраций цианотоксинов в воде до уровней, опасных для здоровья животных и человека, а в отдельных случаях – до уровней наивысшего риска. При этом информированность населения об угрозах, вызванных эвтрофированием, остается низкой.





Для предотвращения развития негативных последствий загрязнения и антропогенного эвтрофирования требуется создание эффективной природоохранной инфраструктуры, строительство очистных сооружений, нормирование воздействия рыбоводства на водную среду, информирование населения о возможных рисках развития цианобактерий.

Инвазивные виды растений и организмов, имеющие преимущества либо получающие их в результате антропогенного воздействия, вытесняют аборигенные виды, что негативно сказывается на биоразнообразии экосистем озер. Вместе с тем в некоторых случаях отмечаются и положительные аспекты интродукции, в частности увеличение рыбопродуктивности в результате инвазии байкальского вселенца *Gmelinoides fasciatus* в Онежское озеро.

В отношении загрязнения окружающей среды антропогенными полимерами, и в частности микропластиком, очевидно, что эти частицы присутствуют повсеместно в окружающей среде, и особо охраняемые природные территории не являются исключением. Вместе с тем сравнение результатов для различных географических районов существенно затруднено из-за различий в применяемых методах отбора и обработки проб. В этой связи требуется разработка унифицированных методов анализа микропластика в окружающей среде. Последствия загрязнения окружающей среды микропластиком остаются до сих пор не до конца ясны, поэтому в отношении этого нового вида загрязнения требуется применение презумпции экологической опасности, закрепленной в законодательстве РФ (абзац 1 ст. 3 ФЗ 10.01.2002 № 7-ФЗ). Для реализации данной стратегии необходимо принять меры по минимизации и предотвращению такого загрязнения (там же, абзац 2).

В рамках работы секции 2 «Экологическая оценка взаимосвязей качества воды и водных сообществ» участники представили и обсудили 17 устных и 7 стендовых докладов. Председатель секции д.б.н. Н. Л. Болотова отметила, что к положительным моментам можно отнести охват исследованиями разных типов водных объектов. Это великие, крупные и малые озера и их притоки, озерно-речные системы, а также водохранилища. Результаты их исследований дают возможность сравнительного анализа происходящих процессов под влиянием природных и антропогенных факторов. В этом смысле значимым является направление исследований, связывающее на примере карельских озер продуктивность с геохимическими особенностями, что позволяет не только

их классифицировать, используя природные факторы, но и выявить уязвимость к антропогенному воздействию в условиях изменения климата.

Важным достижением работы ученых на этой секции является установление приоритетным применение экосистемного подхода и изучение сообществ. Много внимания уделяется процессу эвтрофирования и развитию сообществ в условиях изменения климата. В этом отношении показана перспективность использования палеолимнологических методов на примере уральских озер и фенологического подхода к динамике сообществ на примере Онежского озера. К дискуссионным моментам следует отнести доклад об инвазионном процессе на примере зоопланктона, что отразило актуальность дальнейших исследований и теоретического осмысления этой проблемы.

Участники отметили необходимость обратить внимание на проблемы, связанные с последствиями для водных экосистем синергетического эффекта изменения климата и многофакторного антропогенного воздействия, на развитие направлений исследований, связанных с биогеохимическими процессами в водных экосистемах, а также на расширение индикаторов оценки их экологического состояния, включая изменение метаболома водных растений.

Актуальными также считаются исследования малоизученных групп гидробионтов, включая водные грибы и мшанки, в рамках проблемы как биоинвазий, биоиндикации, так и социально-экономических рисков (инфекции, биообрастания), и исследования, связанные с факторами пространственной структурированности водных экосистем, особенно их прибрежных зон.

При обсуждении результатов работы секции отмечена необходимость выработки подходов к резонансному управлению водными экосистемами, т. е. с учетом экосистемных процессов в рамках проблемы сохранения и устойчивого использования ресурсов и внедрения экономических механизмов в политику управления водными экосистемами для их адекватного природопользования, основанного на реализации концепции экосистемных услуг.

Участники секции 3 «Процессы формирования и преобразования донных отложений озерно-речных и морских систем в условиях изменений климата и антропогенного воздействия» (председатель д.г.н. Н. А. Белкина) представили и обсудили 14 докладов. Рассматривались следующие проблемы: донные отложения озер северо-запада России и их изменения в современных условиях, донные отложения озер и водохранилищ Волжского бассейна, донные

отложения водоемов урбанизированных территорий. Кроме этого, были затронуты вопросы почвенных процессов выветривания в условиях современных климатических изменений.

Представленные доклады охватили широкий спектр проблем седиментологии от фундаментальных исследований до прикладных работ, выполняемых в рамках хозяйственных договоров. В качестве положительных моментов отмечен хорошо внедрившийся в практику изучения седиментационных процессов комплексный подход и высокий уровень методического обеспечения современных исследований донных отложений. Наиболее важным направлением выступает изучение роли донных отложений как источника информации об эволюции водных экосистем в условиях изменения климата и антропогенного воздействия. Участники секции считают, что объем накопленной информации о вещественном составе донных отложений континентальных водоемов позволяет выполнить оценку фоновых характеристик по всей территории Российской Федерации и разработать единую систему нормативных показателей для загрязняющих веществ по географическому принципу.

По итогам работы секции отмечалось, что изучение донных отложений озерно-речных и морских систем позволяет решать широкий круг проблем климатологии, эволюции водных экосистем, геоэкологии и ряда других областей наук. В связи с актуальностью тематики и высоким научным интересом к исследованиям донных отложений в мире предложено организовать на следующей конференции отдельную секцию с рабочим названием «Донные отложения как составная часть мониторинговых наблюдений. Методологические подходы и вопросы нормирования», которая явилась бы информационной платформой для обмена опытом и создания единого подхода к оценке состояния водоема по донным отложениям.

На секции 4 «Современные методы измерений и моделирование термогидрофизических процессов в условиях ускоряющегося изменения абиотических факторов водных экосистем» (председатель д.ф.-м.н. С. А. Кондратьев, зам. председателя к.г.н. Г. Э. Здоровеннова) представлены и обсуждены 16 докладов. Рассмотрены вопросы моделирования внутриводоемных процессов и формирования внешней нагрузки на водные объекты. Отмечалась актуальность разработки новых методов измерения лимнологических процессов с использованием произведенных в РФ измерительных комплексов, которая возрастает в условиях ограничений на приобретение импортного оборудования.

Отечественными лимнологами активно используются и развиваются современные методы натуральных измерений и дистанционного зондирования поверхности земли, внедряются системы онлайн-мониторинга водоемов Арктической зоны России с помощью спутниковых космических систем дистанционного зондирования, что позволяет получать принципиально новые знания и выявлять закономерности изменчивости гидрофизических параметров в зависимости от меняющегося внешнего воздействия на водоемы.

Разрабатываются новые методики измерений с использованием современного высокочувствительного оборудования. Например, новая методика изучения параметров и структуры турбулентности по данным пересекающихся лучей двух акустических доплеровских профилографов течений, разработанная в ИВПС КарНЦ РАН; автономные дрейфтеры с успехом применены коллективом ученых из ИВП РАН и ЛИН РАН для изучения течений в озере Байкал.

Развитие методов математического моделирования позволяет проводить расчет сезонной и межгодовой динамики биогеохимических циклов в крупных пресноводных водоемах (расчет годовых циклов азота и фосфора выполнен для Онежского озера за период с 1985 по 2015 г. на трехмерной модели, разработанной совместными усилиями ученых из СПбФ ОИ РАН и ИВПС КарНЦ РАН).

Участники секции считают, что в настоящее время имеется серьезная научно обоснованная база для создания сотрудниками ИНОЗ РАН, ИВПС КарНЦ РАН, СПбФ ИО РАН, СПбГУ комплексной модели, предназначенной для оценки современного состояния водных экосистем и их водосборных территорий, а также воздействия на них климатических и антропогенных факторов. Представляется целесообразным сконцентрировать усилия специалистов ИВПС и родственных научных организаций на создании комплексной модели системы «водосбор – водоем», имеющей информационную поддержку со стороны разработанных и представленных на конференции систем измерений, обеспечивающих выполнение имитационных и прогностических расчетов с целью решения актуальных задач природопользования и охраны окружающей среды.

В работе секции 5 «Термогидродинамические и биогеохимические процессы в море и прибрежной зоне» (председатель д.г.н. А. В. Зимин, зам. председателя к.г.н. А. В. Толстикова) участвовало 11 человек. Заслушано 5 устных и представлено 2 стендовых доклада, посвященных изучению современного режима верти-

кального перемешивания в остаточных водоемах Аральского моря; особенностям изменчивости проявлений нелинейных внутренних волн и малых вихревых структур в Баренцевом море; математическому моделированию трансформации соединений биогенных элементов в экосистеме Вислинского залива Балтийского моря и экосистемы морского льда Белого моря; многолетней изменчивости адвективного переноса тепла через пролив Фрама.

Под влиянием колебаний климата отмечается значительное изменение термогидродинамических и биогеохимических процессов в различных морях. Эти изменения носят явный и зачастую необратимый характер, что сказывается на хозяйственной деятельности человека, особенно в прибрежных водах. Участники секции пришли к заключению, что на предстоящей конференции, посвященной проблемам озер Евразии, следует уделить внимание возможностям использования методологии сравнения данных наблюдений и моделирования, а также прибрежным процессам и устьевым областям.

Секция 6 «Наука – образованию» была организована и проведена при сотрудничестве с кафедрой наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук Петрозаводского государственного университета. В рамках работы секции для студентов разных курсов и специальностей представлено четыре лекции:

– д.г.н. А. В. Зимин «Современные технические средства океанографических экспедиционных исследований»;

– к.г.н. И. И. Зиганшин «Природно-антропогенная динамика озер Республики Татарстан»;

– д.х.н., профессор Г. Т. Фрумин «Экологические риски»;

– к.г.-м.н. А. Н. Сутурин «Ремедиация полигонов промтоходов БЦБК».

Председатель секции к.г.н. С. П. Гриппа организовал и провел научную экскурсию «Белые ночи в географии» по маршруту: Петрозаводск – д. Царевичи – гора Сампо – Марциальные Воды – каньон реки Суна – палеовулкан Гирвас – водопад Кивач. В экскурсии приняли участие около 30 ученых – гидрологи, химики, биологи из научных организаций и университетов Москвы, Санкт-Петербурга, Иркутска, Казани, Вологды, Архангельска и др.

По материалам конференции подготовлены научные статьи для размещения в серии «Лимнология и океанология» журнала «Труды Карельского научного центра РАН» и, по решению редколлегии указанной серии и согласно резолюции конференции, в «Российском журнале прикладной экологии» (рецензируемое еже-

квартальное научное издание) Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан. Такая уникальная возможность сотрудничества двух научных институтов способствует расширению площадок для опубликования научных результатов коллег из разных регионов России и подготовке совместной конференции «Озера Евразии: современные фундаментальные проблемы и решение практических задач», запланированной на 2024 год.

Участники мероприятия единодушно пришли к выводу о необходимости продолжения работы по указанным направлениям в связи с их крайней актуальностью для использования и охраны водных объектов с применением экологически грамотных и научно обоснованных подходов. Отмечая важность проведения конференции на регулярной основе, ученые выражают уверенность, что рекомендации, выработанные по результатам работы конференции и изложенные в резолюции, будут содействовать развитию научных исследований водных объектов, способствовать укреплению международного сотрудничества, а также помогут обеспечить повышение уровня организации полевых исследований с использованием научно-исследовательских судов. В целях усиления работы с молодежью представители ИПЭН АН РТ предложили провести научно-практическую школу по водной экологии. Директор ЛИН СО РАН А. П. Федотов заявил о возможности ее проведения для финалистов конкурса на оз. Байкал.

Организаторы конференции благодарят отдел информационно-технического сопровождения КарНЦ РАН за возможность успешного проведения онлайн-заседаний на пяти параллельных площадках на двух интернет-платформах, а также Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН – за издание программы конференции.

Пленарные лекции, секционные презентации, стендовые доклады, представленные на конференции, размещены в свободном доступе на сайте ИВПС КарНЦ РАН (<http://water.krc.karelia.ru/event.php?id=352&lang=r>).

*Н. Н. Филатов, чл.-корр. РАН,
председатель Оргкомитета,
Т. И. Регеранд, к. б. н.,
секретарь Оргкомитета*

Материал подготовлен с использованием отчетов председателей секций С. А. Кондратьева, Г. Э. Здорвенновой, М. Б. Зобкова, Н. Л. Болотовой, Н. А. Белкиной, А. В. Толстикова.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершенных оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, утраты науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учетом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются электронная версия статьи, которую авторы вычитывают и заверяют.

Журнал имеет систему электронной редакции на базе Open Journal System (OJS), позволяющую вести представление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронном формате и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Содержание выпусков Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные версии статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объем рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объем рисунков не должен превышать 1/4 объема статьи. Рукописи большего объема (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word в систему электронной редакции на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо высылаются на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

Для публикации в выпусках серии «Математическое моделирование и информационные технологии» рукописи принимаются в формате .tex (LaTeX 2ε) с использованием стилевого файла, который находится по адресу <http://transactions.krc.karelia.ru/section.php?id=755>.

Обязательные элементы рукописи располагаются в следующем порядке:

УДК курсивом в левом верхнем углу первой страницы; заглавие статьи на русском языке полужирным шрифтом; инициалы и фамилии авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название и полный почтовый адрес организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов аффилированным организациям; следует отметить звездочкой автора, ответственного за переписку, и указать в аффилиации его электронный адрес); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; указание источников финансирования выполненных исследований на русском языке.

Далее располагаются все вышеуказанные элементы на английском языке.

Текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности; списки литературы на языке оригинала (**Литература**) и на английском языке (**References**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; можно указать телефон для контакта редакции с авторами статьи.

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать ее содержание и состоять из 8–10 значащих слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (как правило, не менее пяти). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце точка не ставится.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. На табличный и иллюстративный материал следует ссылаться так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т.д.), фотографии, помещаемые на вкладышах (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо первым словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации.

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы могут быть снабжены указанием желательного размера рисунка, пожеланиями и требованиями к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Крупномасштабные карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с мелкомасштабной картой, где обозначен представленный на основной карте участок.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточную информацию для того, чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. Названия таксонов рода и вида даются курсивом. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желателью с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicus* (Gmelin, 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все прочие сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. Располагаются после основного текста статьи отдельным абзацем, в котором авторы выражают признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и организациям, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ. При подаче статьи авторы должны раскрыть потенциальные конфликты интересов, которые могут быть восприняты как оказавшие влияние на результаты или выводы, представленные в работе. Если конфликт интересов отсутствует, следует об этом сообщить в отдельной формулировке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Источники располагаются в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами авторов ставится пробел.

REFERENCES. Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические записи источников оформляются согласно стилю Vancouver (см. примеры в ГОСТ Р 7.0.7-2021 и образцы ниже) и располагаются в алфавитном порядке. Заголовки русскоязычных работ приводятся на английском языке; для журналов и сборников, в которых размещены цитируемые работы, указывается параллельное английское наименование (при его наличии) либо русскоязычное наименование приводится в латинской транслитерации (вариант BSI) с переводом на английский язык. Прочие элементы библиографической записи приводятся на английском языке (русскоязычное название издательства транслитерируется). При наличии переводной версии источника в References желателью указать ее. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Для каждого источника обязательно указание DOI при его наличии; если приводится адрес интернет-страницы источника (URL), нужно указать дату обращения к ней.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 577.125.8

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАБОЛИТОВ ОКСИДА АЗОТА В КРОВИ ЗДОРОВЫХ ЛЮДЕЙ И ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗНЫЕ АЛЛЕЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ГЕНОВ ACE (RS4340) И CYP11B2 (RS1799998)

Л. В. Топчиева^{1*}, О. В. Балан¹, В. А. Корнева², И. Е. Малышева¹

¹Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *topchieva@ya.ru

²Петрозаводский государственный университет (просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: артериальная гипертензия; оксид азота; индуцибельная синтаза оксида азота; ангиотензинпревращающий фермент; инсерционно-делеционный полиморфизм гена ACE; альдостеронсинтаза; ген CYP11B2

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0218-2019-0077).

L. V. Topchieva^{1*}, O. V. Balan¹, V. A. Korneva², I. E. Malysheva¹. THE NITRIC OXIDE LEVEL IN THE BLOOD OF HEALTHY PEOPLE AND PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION CARRYING DIFFERENT ALLELE VARIANTS OF THE ACE (RS4340) AND CYP11B2 (RS1799998) GENES

¹Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *topchieva@ya.ru

²Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

Аннотация на английском языке

Keywords: arterial hypertension; nitric oxide; inducible nitric oxide synthase; angiotensin-converting enzyme; insertion-deletion polymorphism of ACE genes; aldosterone synthase; CYP11B2 gene

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (0218-2019-0077).

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм ² Chloroplast cross-sectional area, μm ²	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм ² Mitochondria cross-sectional area, μm ²	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм ² Peroxisome cross-sectional area, μm ²	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // Entomologica Fennica. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

References:

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews*. 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

Литература:

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)*. Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Литература:

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

Литература:

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

References:

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

Литература:

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

References:

Grebenshchikov Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

Ссылки на интернет-ресурсы

Литература:

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
No. 6, 2022
“LIMNOLOGY AND OCEANOLOGY” Series

TABLE OF CONTENTS

EDITORIAL	5
HYDROPHYSICS. HYDROLOGY	
S. V. Cherkasov, I. M. Farkhutdinov. EXPERIMENTAL APPLICATION OF BOTTOM TEMPERATURE MEASUREMENTS IN LAKES OF BOLSHOY SOLOVETSKY ISLAND TO TEST THE GEOTHERMAL ANOMALY HYPOTHESIS	6
L. E. Nazarova. PRECIPITATION OVER THE WHITE SEA CATCHMENT AREA	16
S. G. Demyshev, O. A. Dymova. ANALYSIS OF THE LORENZ ENERGY CYCLE FOR DIFFERENT REGIMES OF THE BLACK SEA CIRCULATION	26
S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova. IMPACT OF FUTURE CLIMATE CHANGE ON RUNOFF IN LAKE ONEGO CATCHMENT AREA	41
HYDROCHEMISTRY AND BOTTOM SEDIMENTS	
G. T. Frumin, O. V. Tereshchenko. TROPHIC STATUS OF LAKE ILMEN (2003–2020)	50
E. V. Ivanova, D. A. Tikhonova. ESTIMATION OF MICROPLASTIC CONTENT IN LAKE LADOGA	58
G. T. Frumin. PHARMACEUTICAL WASTE – A NEW THREAT TO LAKE ECOSYSTEMS	68
N. E. Galakhina, M. B. Zobkov. HYDROCHEMICAL STUDIES OF THE TROUT FARMING AREA IN KONDOPOGA BAY OF LAKE ONEGO IN THE WINTER OF 2022	76
E. Yu. Yakovlev, A. S. Druzhinina, S. V. Druzhinin, N. L. Ivanchenko. ASSESSMENT OF THE IMPACT OF INDUSTRIAL DISCHARGES ON SURFACE WATER QUALITY IN THE KOLA PENINSULA	88
HYDROBIOLOGY	
Yu. V. Krylova, E. A. Kurashov, A. M. Ponomarenko, E. S. Svetashova, M. A. Sinyakova, S. B. Eki-mova, E. V. Protopopova, E. V. Kolosovskaya, V. V. Khodonovich, E. Ya. Yavid, D. G. Aleshina, E. A. Kurashov, M. A. Guseva, T. N. Petrova. CURRENT STATE OF ZOOPLANKTON IN THE LOWER COURSE OF THE UKSUNJOKI RIVER (NORTHERN LADOGA REGION)	102
D. G. Aleshina, E. A. Kurashov, M. A. Guseva, T. N. Petrova. CURRENT STATE OF ZOOPLANKTON IN THE LOWER COURSE OF THE UKSUNJOKI RIVER (NORTHERN LADOGA REGION)	121
S. G. Mikhalap, E. M. Vorob’eva, D. N. Sudnitsyna, V. V. Borisov. APPLICATION OF MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS METHODS IN STUDYING THE DYNAMICS OF PLANKTONIC CYANOBACTERIA, DIATOMS AND CHLOROPHYTA BIOMASS IN THE SOUTHERN PART OF LAKE PEIPUS	133

RESEARCH METHODS

K. A. Podgornyi, O. A. Dmitrieva. MATHEMATICAL MODELING OF THE TRANSFORMATIONS OF NUTRIENT COMPOUNDS IN THE VISTULA LAGOON ECOSYSTEM, BALTIC SEA 142

N. N. Filatov, V. N. Baklagin, A. V. Isaev, S. A. Kondratyev, O. P. Savchuk. DEVELOPING A “LAKE – CATCHMENT” INFORMATION ANALYSIS SYSTEM AS A METHOD FOR BASIC RESEARCH AND A TOOL FOR DECISION-MAKING (LAKE ONEGO CASE STUDY) 161

RECREATIONAL POTENTIAL EVALUATION

N. L. Bolotova, I. A. Mukhin, O. G. Lopicheva. APPROACHES TO ASSESSING ECOSYSTEM SERVICES OF LAKE LADOGA 173

CHRONICLE

N. N. Filatov, T. I. Regerand. International conference with participants from CIS countries “Assessing the state of lake and sea resources and ecosystems under current climate change and socio-economic development” (Petrozavodsk, September 12-14, 2022) 188

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 195

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 6, 2022

ЛИМНОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 8 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций¹²
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Л. Э. Бюркланд

Подписано в печать 25.10.2022. Дата выхода 31.10.2022. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 21,3. Усл. печ. л. 23,6.
Тираж 100 экз. Заказ 735. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50