

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 озераведения 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].

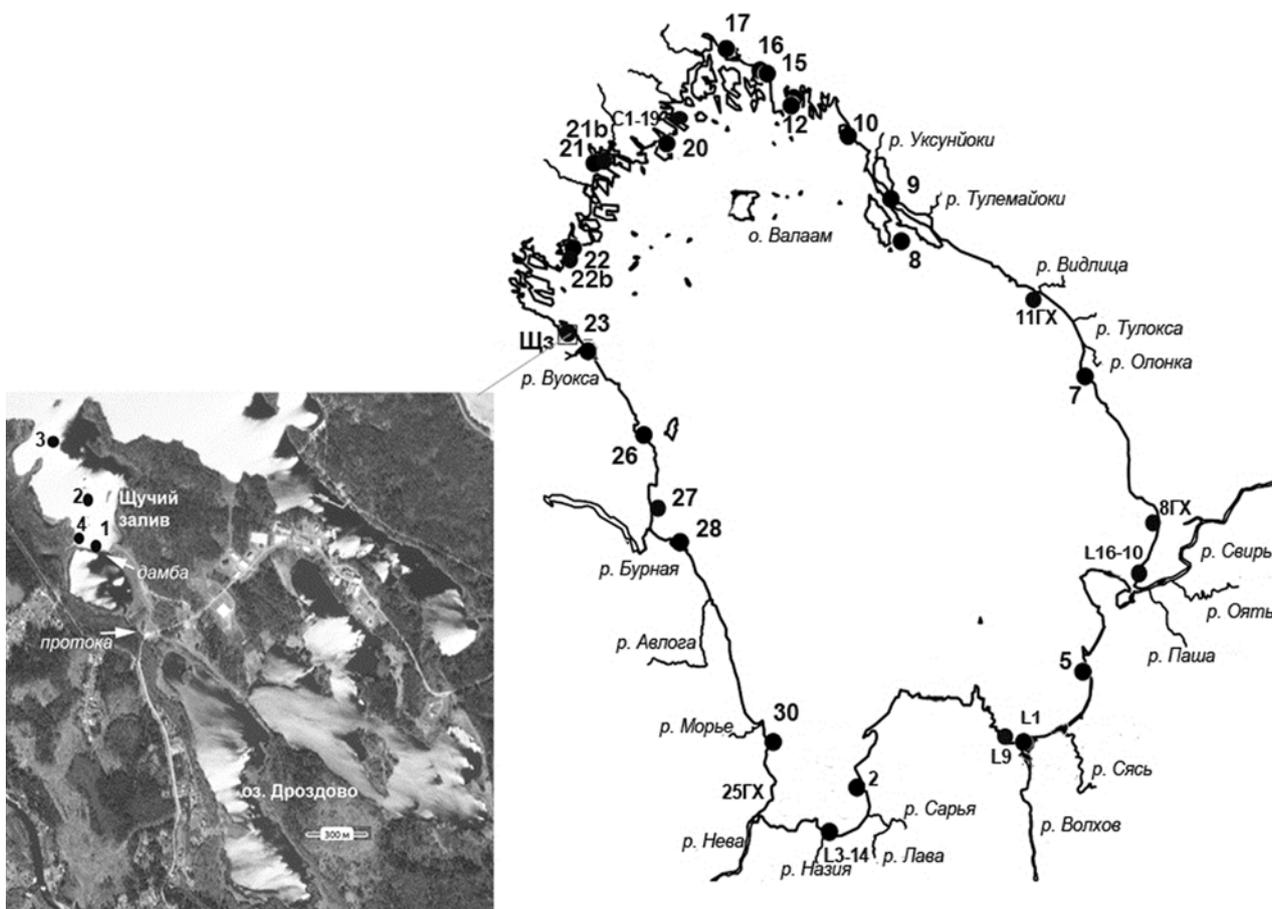


Схема станций отбора проб в прибрежной зоне Ладожского озера (картографические данные Яндекс <https://yandex.ru/maps/>).

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 плодовитости), 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 _{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 Р_{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

Андрионикова 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 плодovitости 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.

Игнатъева Н. В., Петрова Т. Н., Гусева М. А. Оценка загрязненности поверхностных вод на территории водосборного бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 6. С. 91–96.

Игнатъева 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., Игнатъева 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 // Ладога. СПб.: Нестор-История, 2013. С. 222–226.

Щербак В. А. Нефтяные углеводороды // Ладога. 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., Terzhevik 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 ozero = 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 ozero 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