



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 3 (49). Сентябрь, 2023

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
В. Krasnov
А. Gugołek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, 33.
E-mail: saf@petsu.ru
<http://ecopri.ru>





УДК 556.5+557.473.21

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДОТОКОВ С ВЫСОКОЙ ЦВЕТНОСТЬЮ ВОДЫ (НА ПРИМЕРЕ ПРИТОКОВ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА)

МАКАРОВА
Елена Михайловна

Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук" (ИВПС КарНЦ РАН) (Россия, Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), emm777@bk.ru

КАЛИНКИНА
Наталья
Михайловна

доктор биологических наук, Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук" (ИВПС КарНЦ РАН) (Россия, Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), cerioda@mail.ru

САБЫЛИНА
Альбина Васильевна

кандидат химических наук, Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук" (ИВПС КарНЦ РАН) (Россия, Республика Карелия, 185030, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50), nwpri.karelia@yandex.ru

Ключевые слова: притоки Онежского озера, гидрохимический состав, бактериопланктон, оценка качества воды, метод главных компонент

Получена: 31 августа 2023 года
Подписана к печати: 05 октября 2023 года

Аннотация. Представлены результаты исследований гидрохимических и микробиологических показателей притоков юго-западного, северо-западного и северного побережий Онежского озера. Химический состав большинства изученных водотоков формируется под воздействием заболоченной водосборной территории (высокие показатели цветности, содержания железа) и антропогенной нагрузки. Известно, что содержание гумусовых веществ может снижать доступность для биоты тяжелых металлов, изменять проницаемость клеточной мембраны, что в конечном итоге может модифицировать влияние антропогенного фактора. Биота, и в частности бактериопланктон, способны разнонаправленно реагировать на присутствие гумусовых веществ в воде, что может влиять на оценку качества воды по общепринятым классификациям, разработанным для светловодных водоемов. С помощью метода главных компонент показано отсутствие влияния заболоченных водосборных территорий на речную микробиоту. Доказана ведущая роль антропогенного фактора в количественном развитии бактериопланктона притоков Онежского озера и возможность применения микробиологических показателей для оценки состояния малых рек с высокой цветностью воды.

© Петрозаводский государственный университет

Введение

Бактерии играют главную роль в геохимических процессах, участвуя в передаче энергии и вещества в пищевых сетях. Высокая скорость метаболизма обеспечивает бактериям более быструю, чем у других компонентов биоты, реакцию на незначительные изменения условий среды, а разнообразие способов функционирования обеспечивает способность к деструкции специфических веществ, в т. ч. и антропогенного происхождения, недоступных другим организмам. Эти особенности определяют высокую индикаторную значимость бактерий в биомониторинге.

Использование микробиологических показателей при оценке качества воды водотоков Карелии является сложной задачей, поскольку высокое содержание в воде гумусовых веществ, характерное для рек Карелии (Лозовик и др., 2006, 2013), может изменять активность бактерий. Известно, что биомасса гетеротрофных бактерий может возрастать в присутствии гуминовых веществ (Traavik, Höfle, 1987), однако гуминовые вещества, в свою очередь, могут снижать активность бактерий в пресной воде за счет хелатирования микроэлементов и влияния на Р-цикл (Jones et al., 1988). Также доказано (Visser, 1985), что низкие концентрации гумусовых веществ могут сильно стимулировать, а высокие – подавлять развитие микроорганизмов. Так, при концентрации растворенного органического углерода – прямого показателя присутствия гумусовых веществ – более 20 мг С/л количественные показатели бактерий снижались, что объясняется увеличением в воде токсичных органических соединений, таких как фенолы (James, 1991a, b). Кроме того, было отмечено, что токсический эффект растворенного органического углерода в темных водах усиливался в осенний период при снижении рН воды. К неспецифическим эффектам гумусовых веществ на микробиоценозы относят как физическое, так и химическое раздражение мембран, стимуляцию и изменения биотрансформации ферментов, стимуляцию белков-шаперонов, защиту от окислительного стресса (Steinberg et al., 2006). В свою очередь, гетеротрофные бактерии, являясь основными деструкторами гумусовых веществ в водных

экосистемах, могут трансформировать их в свою биомассу и реминерализовывать в неорганический углерод (Kisand et al., 2008).

В условиях карельского региона актуальной проблемой становится оценка реакции биоты на действие загрязняющих веществ (ливневых стоков) на фоне действия природных факторов – поступления большого количества гумусовых веществ, которые определяют повышенную цветность воды. Современные же классификаторы качества воды нацелены на оценку антропогенного воздействия, главным образом, светловодных водоемов.

Микробиологическая индикация качества водной среды становится наиболее эффективной при одновременном изучении химического состава воды, который необходимо учитывать, принимая во внимание разнообразие способов функционирования бактерий. В условиях влияния на речные экосистемы заболоченной водосборной территории важной задачей становится изучение возможных связей между содержанием гумусовых веществ и количественными показателями бактериопланктона, что позволяет уточнить индикаторную роль бактерий при биомониторинге высокоцветных вод.

Цель настоящего исследования – оценить возможность применения общепринятых классификаторов качества вод по микробиологическим показателям в условиях карельского гидрографического региона.

Материалы

Для выявления связей между химическими и микробиологическими характеристиками в 2015 г. были отобраны пробы воды на приустьевых участках 12 притоков Онежского озера, различающихся по степени заболоченности водосборной территории (5–13 %) и антропогенному влиянию. В наибольшей степени подвержены антропогенному воздействию реки Лососинка и Неглинка, протекающие по территории г. Петрозаводска. Средняя степень антропогенной нагрузки характерна для р. Нелуксы, частично дренирующей территорию свалки г. Петрозаводска, и рек Кумса и Вичка, протекающих по территории г. Медвежьегорска. Наименьшая антропогенная нагрузка выявлена для остальных рек (р. Орзег, р. Деревянка, р. Уя, р. Пухта, р. Шокша, руч. Железный и р. Лижма), вдоль берегов которых расположены небольшие дачные поселения.

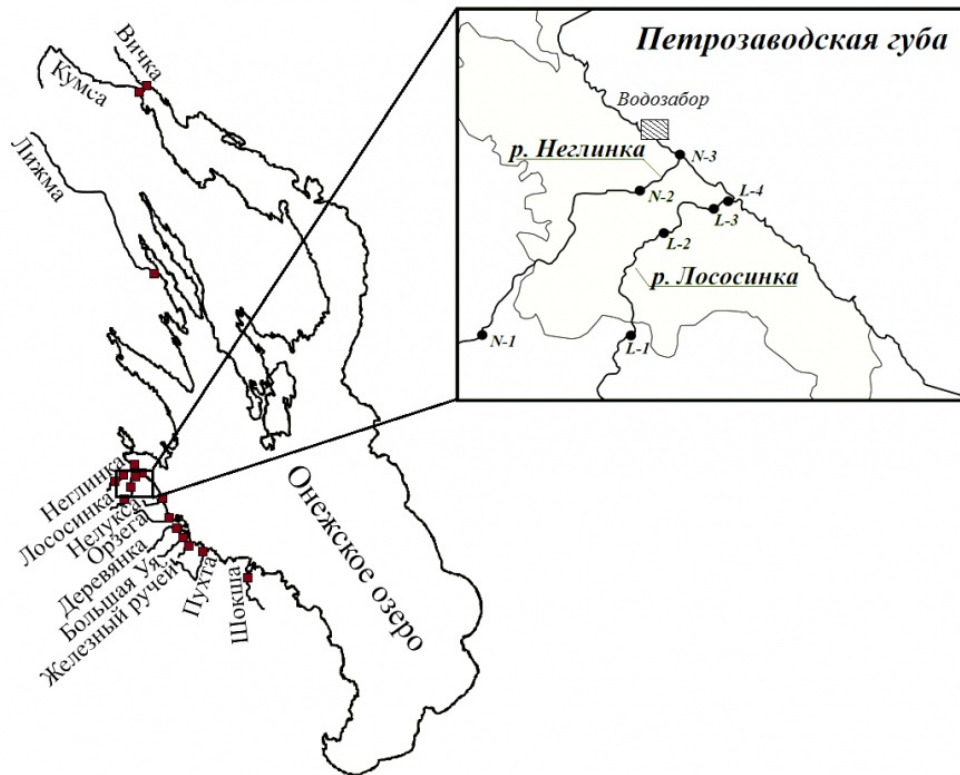


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб на притоках Онежского озера. На р. Лососинке: ст. L-1 – за пределами городской черты, ст. L-2, L-3, L-4 – на городской территории; на р. Неглинке: ст. N-1 – за пределами городской черты выше по течению; ст. N-2, N-3 – на городской территории

Fig. 1. Layout of sampling stations on the tributaries of Lake Onega. On the river Lososinka: station L-1 – outside the city limits, stations L-2, L-3, L-4 – in the urban area; on the river Neglinka: station N-1 – outside the city limits upstream; stations N-2, N-3 – in an urban area

Методы

Пробы воды отбирали из поверхностного слоя в медиальной части рек (МУК 4.2.3690-21; ГОСТ 31942-2012).

Из числа химических показателей в пробах воды определяли рН потенциметрически на рН-метре, цветность (Алекин и др., 1973), содержание растворенного кислорода и БПК₅ (Руководство..., 1977), химическое потребление кислорода (ХПК) (Аналитические..., 2017), содержание взвешенных веществ (ПНД Ф 14.1:2.110–97), общего железа (Fe_{общ}) (РД 52.24.427-2013), общего фосфора (P_{общ}) (ПНД Ф 14.1:2.106–97), минерального фосфора (P_{мин}) (ПНД Ф 14.1:2:4.248–07), нефтепродуктов (РД 52.24.476–2007) по стандартным методикам.

В ходе микробиологического анализа были определены: общая численность бактерий (ОЧБ) (Zimmermann et al., 1978; Handbook..., 1993), а также численность экологотрофических групп бактериопланктона: сапрофитных (СБ) и олигокарбофильных бактерий (ОКБ) (Романенко, Кузнецов, 1974; Кузнецов, Дубинина, 1989), фенолрезистентных (ФРБ) и углеводородокисляющих (УОБ) бактерий (Кузнецов, Дубинина, 1989), показателей санитарного состояния воды – общее микробное число (ОМЧ) и бактерии группы кишечной палочки (БГКП) (МУК 4.2.3721-21).

В качестве статистических характеристик изменчивости химических и

микробиологических показателей рассчитывали среднее значение по выборке и его ошибку. Для изучения связей между гидрохимическими и микробиологическими показателями использовали метод главных компонент (Коросов, 1996). Основой для этого анализа послужили логарифмированные гидрохимические и микробиологические показатели воды по 21 станции 12 притоков Онежского озера за 2015 г. Логарифмирование показателей осуществляли с целью снизить соотношение размерности показателей и приблизить их распределение к нормальному, как это рекомендовано в работе В. К. Шитикова с соавторами (2005). В качестве значимых принимали главные компоненты с дисперсией ≥ 1 и факторные нагрузки признаков с относительными значениями $\geq |0.7|$.

Для количественного выражения связей между показателями использовали коэффициент корреляции Спирмена. При оценке достоверности коэффициента корреляции использовался уровень значимости 0.05. Статистическая обработка данных осуществлялась в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for WindowsRu.

Результаты

Характеристика химического состава воды притоков Онежского озера

Гидрохимические показатели изученных рек были разделены на две группы. В первую группу вошли показатели, характеризующие влияние заболоченной водосборной территории (региональный геохимический фон) (табл. 1). К ним были отнесены косвенные показатели, отражающие содержание трудноокисляемых гумусовых веществ, – ХПК и цветность. К этой же группе показателей было отнесено содержание железа, связанного с гумусовыми веществами, а также величина рН – индикатор влияния заболоченных водосборов (Лозовик, 2006, 2013).

Таблица 1. Фоновые показатели химического состава воды притоков Онежского озера в период исследований

Приток	рН	Цветность, град.	ХПК, мгО/л	Fe _{общ} , мг/л
Лососинка, ст. L-1	6.6–7.6 (6) 7.2 ± 0.2	94–136 (6) 155 ± 7	12.5–39.9 (6) 21.8 ± 4.5	1.06–2.76 (5) 1.69 ± 0.30
Лососинка, ст. L-2, L-3, L-4	6.4–7.6 (18) 7.2 ± 0.1	102–201 (18) 132 ± 6	10.9–34.3 (18) 23.2 ± 1.7	0.99–3.42 (15) 1.88 ± 0.21
Неглинка, ст. N-1	4.3–5.2 (6) 4.7 ± 0.2	270–384 (6) 339 ± 180	33.7–47.2 (6) 40.6 ± 2.1	1.22–5.09 (5) 2.76 ± 0.65
Неглинка, ст. N-2, N-3	6.5–7.8 (13) 7.2 ± 0.1	34–285 (13) 146 ± 240	12.5–46.8 (10) 26.9 ± 3.3	0.67–4.04 (8) 1.92 ± 0.39
Железный	6.3–7.3 (6) 7.0 ± 0.2	48–200 (5) 127 ± 29	21.34–7.12 (5) 38.26 ± 9.54	0.78–3.58 2.24 ± 0.5
Нелукса	7.5 (2)	87–88 (2) 88 ± 0.5	38.1–55.2 (2) 46.65 ± 8.6	0.57–0.59 (2) 0.58 ± 0.01

Орзega	6.85–7.15 (2) 7.0 ± 0.15	81–285 (2) 183 ± 102	36–99.6 (2) 67.8 ± 31.8	0.95–1.55 (2) 1.25 ± 0.01
Деревянка	7.7–7.86 (2) 7.8 ± 0.1	37–55 (2) 46 ± 9	32.9–37.9 (2) 35.4 ± 2.5	0.56–0.83(2) 0.70 ± 0.14
Пухта	6.9–7.1 (2) 7.0 ± 0.1	132–135 (2) 134 ± 1.5	57.3–67.3 (2) 62.3 ± 5	3.0–3.19 (2) 3.10 ± 0.10
Шокша	6.95–7.55 (2) 7.3 ± 0.3	116–145 (2) 131 ± 15	42.1–54.1 (2) 48.1 ± 6	2.93–3.7 (2) 3.32 ± 0.39
Уя	7.1–7.35 (2) 7.2 ± 0.1	49–55 (2) 52 ± 3	37.6–40 (2) 38.8 ± 1.2	0.53–1.09 (2) 0.81 ± 0.28
Лижма	7.4–7.5 (2) 7.5 ± 0.05	19–23 (2) 21 ± 2	25.4–26 (2) 25.7 ± 0.3	0.092–0.125 (2) 0.11 ± 0.02
Вичка	7.25–7.35 (2) 7.3 ± 0.05	64–99 (2) 82 ± 18	34–45.5 (2) 39.75 ± 5.8	0.63–0.64 (2) 0.64 ± 0.01
Кумса	7.31–7.46 (2) 7.4 ± 0.1	40–62 (2) 51 ± 11	27.2–36.6 (2) 31.9 ± 4.7	0.27–0.38 (2) 0.33 ± 0.06

Примечание. В числителе – Min–Max (в скобках – количество проб); в знаменателе – средняя и ее ошибка для уровня вероятности $P = 0.95$.

Во вторую группу вошли гидрохимические показатели, характеризующие антропогенное влияние на притоки: величина БПК₅, свидетельствующая об интенсивности загрязнения речных вод легкоминерализуемым ОВ, содержание общего и минерального фосфора, взвешенных веществ, нефтепродуктов, а также содержание в воде растворенного кислорода, расходуемого на окисление легкоминерализуемого ОВ (табл. 2). В табл. 2 содержание нефтепродуктов в речных водах не приведено, поскольку для большинства изученных рек их концентрация не превышала уровня чувствительности метода определения, т. е. была менее 0.02 мг/л. Лишь в воде р. Неглинки в черте г. Петрозаводска среднее содержание нефтепродуктов составило 0.07 мг/л.

Таблица 2. Химические показатели воды притоков Онежского озера, характеризующие их антропогенное загрязнение в период исследований

Приток	O ₂ , мг O ₂ /л	Насыщение, %	БПК ₅ , мг O ₂ /л	Взвешенные вещества, мг/л	P _{общ} , мкг/л	P _{мин} , мкг/л
Лососинка, ст. L–1	9.3–12.1(8) 10.5 ± 0.4	84–91(8) 88 ± 1	1.04–3.85(7) 1.57 ± 0.38	9.5–58(6) 35.8 ± 7.7	18–232(5) 85 ± 40	5–56(5) 30 ± 9

Лососинка, ст. L-2, L-3, L-4	8.8–12.7(24) 10.5 ± 0.4	78–94(24) 89 ± 1	1.22–3.61(21) 1.71 ± 0.11	2.5–238(6) 40.6 ± 12.9	16–186(15) 72 ± 13	4–62(15) 34 ± 6
Неглинка, ст. N-1	7.6–10.3(8) 8.8 ± 0.4	62–73(8) 69 ± 1	0.88–1.9(8) 1.23 ± 0.13	9–92(6) 31.6 ± 12.5	42–162(5) 92 ± 21	4–31(5) 18 ± 5
Неглинка, ст. N-2, N-3	5.6–11.5(16) 9.0 ± 0.5	51–92(16) 74 ± 3	1.09–6.4(16) 3.69 ± 0.4	4.5–120(11) 29.76 ± 11.96	106–339(8) 200 ± 29	39–273(5) 154 ± 27
Железный	2.9–12.5(8) 8.6 ± 1.1	26–90(8) 70 ± 7	0.53–2.54(7) 1.26 ± 0.27	1.5–25.5(5) 14.3 ± 4.06	18–25(4) 21 ± 0.002	5–10(4) 9 ± 0.001
Нелукса	9.26–10.3(2) 9.78 ± 0.52	87–89(2) 88 ± 1	0.62–0.9(2) 0.76 ± 0.14	1.1–1.5(2) 1.3 ± 0.2	37–38(2) 37.5 ± 0.5	7–8(2) 7.5 ± 0.5
Орзega	7.22–8.8(2) 8.01 ± 0.8	70–76 (2) 73 ± 3	1.36–1.48(2) 1.42 ± 0.06	3.6–4.8(2) 4.2 ± 0.6	78–97(2) 87.5 ± 9.5	36–47(2) 41.5 ± 5.5
Деревянка	10.1–10.6(2) 10.45 ± 0.35	94–98(2) 96 ± 2	0.84–1.39(2) 1.12 ± 0.28	1.6–4(2) 2.8 ± 1.2	54–74(2) 64 ± 10	22–40(2) 31 ± 9
Пухта	7.19–9.02(2) 8.11 ± 0.91	71–78(2) 74.5 ± 4	1.16–1.54(2) 1.35 ± 0.19	3.2–3.6(2) 3.4 ± 0.2	43–49(2) 46 ± 3	9–15(2) 12 ± 3
Шокша	8.22–8.94(2) 8.58 ± 0.36	73–90(2) 81.5 ± 9	1.12–1.21(2) 1.17 ± 0.04	2.8–6.6(2) 4.7 ± 1.9	34–37(2) 35.5 ± 1.5	8(2)
Уя	7.28–9.78(2) 8.53 ± 1.25	69–85(2) 77 ± 8	0.75–1.24(2) 1.00 ± 0.25	0–2.2(2) 1.1 ± 1.1	13–20(2) 16.5 ± 3.5	1–3(2) 2 ± 1
Лижма	8.45–10.1(2) 9.28 ± 0.83	88–94(2) 91 ± 3	0.52–0.74(2) 0.63 ± 0.11	0.3–0.75(2) 0.53 ± 2.23	12(2)	1(2)
Вичка	8.92–10.6(2) 9.76 ± 0.84	88–90(2) 89 ± 1	1.25–1.52(2) 1.39 ± 0.14	1.5–2(2) 1.75 ± 0.25	19–24(2) 21.5 ± 2.5	3–4(2) 3.5 ± 0.5
Кумса	8.77–10.1(2) 9.44 ± 0.67	88–90(2) 89 ± 1	1.27–1.71(2) 1.49 ± 0.22	0.6–1.5(2) 1.05 ± 0.45	10–13(2) 11.5 ± 1.5	1–2(2) 1.5 ± 0.5

Примечание. В числителе – Min–Max (в скобках – количество проб); в знаменателе – средняя и ее ошибка для уровня вероятности $P = 0.95$.

Количественные показатели бактериопланктона притоков Онежского озера

В период исследований общая численность бактерий (ОЧБ) в воде притоков Онежского озера варьировала от 0.42 до 7.46 млн кл./мл (табл. 3).

Таблица 3. Микробиологические показатели притоков Онежского озера

Приток	ОЧБ	СБ	ОКБ	ФРБ	УОБ	ОМЧ	БГКП
	млн кл./мл		×10 ³ , КОЕ/мл				×10 ³ , КОЕ/л

Лососинка, ст. L-1	1.73–3.35(8) 2.4 ± 0.21	0.2–3.4(8) 1.2 ± 0.4	0.2–3.4(8) 1.2 ± 0.4	0.1–2.0(8) 0.9 ± 0.3	0.02–0.1(8) 0.7 ± 0.2	0.04–0.2(8) 0.09 ± 0.02	1.0–30.3(8) 9.8 ± 3.9
Лососинка, ст. L-2, L-3, L-4	1.75–4.76(24) 3.17 ± 0.17	0.6–6.1(24) 3.3 ± 0.4	1.1–20(24) 8.1 ± 0.8	0.5–5.9(24) 2.5 ± 0.3	0.2–1.5(24) 0.7 ± 0.3	0.2–1.9(24) 0.6 ± 0.09	22.4–218(24) 72.6 ± 11.1
Неглинка, ст. N-1	0.42–2.54(8) 1.33 ± 0.25	0.1–2.2(8) 0.9 ± 0.2	0.6–4.6(8) 1.6 ± 0.5	0.1–2.0(8) 0.7 ± 0.2	0.05–0.6(8) 0.3 ± 0.06	0.03–0.2(8) 0.09 ± 0.2	0.8–40.7(8) 10.6 ± 5.1
Неглинка, ст. N-2, N-3	0.57–7.46(16) 3.84 ± 0.41	1.0–196(16) 28.4 ± 12.2	8.9–429(16) 78.2 ± 28.2	0.4–88(16) 18.4 ± 5.6	0.1–23(16) 6.4 ± 1.8	0.1–46.0(16) 9.9 ± 3.9	38–1324(16) 488 ± 102
Железный	0.83–3.14(8) 1.77 ± 0.31	0.3–5.4(8) 1.3 ± 0.6	1.2–9.9(8) 4.4 ± 1.1	0.3–3.0(8) 1.3 ± 0.3	0.07–0.3(8) 0.2 ± 0.03	0.01–0.5(8) 0.1 ± 0.06	0.2–42(8) 11.9 ± 5.2
Нелукса	1.68–1.88(2) 1.78 ± 0.1	0.7–3.73(2) 2.2 ± 1.5	1.7–9.3(2) 5.5 ± 3.8	0.2–2.3(2) 1.3 ± 1.1	0.4–0.7(2) 0.5 ± 0.2	0.1–0.23(2) 0.16 ± 0.07	5.6–32.2(2) 18.9 ± 13.3
Орзega	1.48–2.04(2) 1.76 ± 0.28	1.2–1.7 (2) 1.5 ± 0.3	4.5–5.1(2) 4.8 ± 0.3	1.2–1.3(2) 1.25 ± 0.01	0.3–1.0(2) 0.6 ± 0.3	0.04–0.06(2) 0.05 ± 0.01	7.0–8.9(2) 8.0 ± 1.0
Деревянка	1.07–1.50(2) 1.28 ± 0.22	1.9–3.1 (2) 2.5 ± 0.6	5.8–11.2(2) 8.5 ± 2.7	1.1–1.3(2) 1.2 ± 0.1	0.4–1.4(2) 0.9 ± 0.5	0.1–0.16(2) 0.13 ± 0.03	8.5–16.4(2) 12.5 ± 4.0
Пухта	2.75–2.87(2) 1.81 ± 0.06	2.2–3.7 (2) 2.8 ± 0.7	3.8–5.9(2) 4.9 ± 1.0	1.4–3.6(2) 2.5 ± 1.0	0.4–2.1(2) 1.3 ± 0.9	0.06–0.67(2) 0.37 ± 0.3	4.5–6.6(2) 5.6 ± 1.1
Шокша	2.32–2.50(2) 1.41 ± 0.09	0.7–2.74 (2) 1.6 ± 0.9	2.7–8.0(2) 5.4 ± 2.7	1.6–1.7(2) 1.7 ± 0.06	0.7–1.0(2) 0.8 ± 0.2	0.07–0.15(2) 0.11 ± 0.04	3.4–10.6(2) 7.0 ± 3.0
Уя	1.66–2.97(2) 2.32 ± 0.65	1.1–2.6 (2) 1.9 ± 0.7	8.5–11.0(2) 9.8 ± 1.2	0.9–1.2(2) 1.1 ± 0.1	0.3–0.9(2) 0.6 ± 0.3	0.04–0.06(2) 0.05 ± 0.01	4.9–7.0(2) 6.0 ± 1.0
Лижма	1.81–2.07(2) 1.94 ± 0.13	0.4–0.7 (2) 0.6 ± 0.2	1.1–1.3(2) 1.2 ± 0.1	0.3–1.0(2) 0.6 ± 0.3	0.16–0.22(2) 0.19 ± 0.03	0.01–0.05(2) 0.16 ± 0.07	2.4–4.7(2) 3.6 ± 1.1
Вичка	4.68 (1)	1.50 (1)	8.30 (1)	2.90 (1)	0.90 (1)	0.60 (1)	22522(1)
Кумса	2.33 (1)	0.65 (1)	2.06 (1)	1.40 (1)	0.19 (1)	0.15 (1)	12581(1)

Примечание. В числителе – Min–Max (в скобках – количество проб); в знаменателе – средняя и ее ошибка для уровня вероятности $P = 0.95$.

Сапрофитные бактерии (СБ), способные развиваться при высоких концентрациях легкоминерализуемого органического субстрата и являющиеся индикаторами активности процесса самоочищения воды, достигали высоких показателей в реках и изменялись от 0.1×10^3 до 196×10^3 КОЕ/мл.

Доминирующей в природном бактериопланктонном сообществе является олигокарбофильная группа бактерий (ОКБ), благодаря способности этой группы бактерий к высокой скорости роста при низких концентрациях ОВ. Их численность варьировала в широких пределах – от 0.2×10^3 до 429×10^3 КОЕ/мл.

Количество бактерий и их качественный состав в воде притоков могут быть связаны с влиянием в т. ч. природных факторов. Вода притоков Онежского озера характеризуется цветностью в пределах 19–384 град. (см. табл. 1). Высокие показатели цветности воды свидетельствуют о содержании большого количества гумусовых веществ, поступающих с заболоченных водосборных территорий. Показано, что в составе гумусовых веществ присутствуют фенольные соединения (Зобкова, Галахина, 2019). В связи с этим необходимо отметить интенсивное развитие в воде изученных рек фенолрезистентных микроорганизмов (ФРБ), численность которых обуславливается поступлением фенольных соединений как в комплексе с гумусовым ОВ, так и с загрязнением воды фенолами, поступающими с антропогенными стоками. Их численность варьировала в пределах 0.1×10^3 – 88×10^3 КОЕ/мл.

Индикаторами загрязнения воды нефтепродуктами являются показатели численности углеводородокисляющих микроорганизмов (УОБ). Их количество изменялось от 0.02×10^3 до 23×10^3 КОЕ/мл. Согласно классификации качества пресных вод (на примере р. Которосль) (Виноградов и др., 2001), развитие ФРБ и УОБ в реках свидетельствовало о средней или высокой степени загрязнения притоков.

Санитарное состояние притоков оценивали по количественным показателям ОМЧ и БГКП, численность которых свидетельствует о наличии фекального загрязнения и степени безопасности речных вод для рекреационного использования. Количество ОМЧ за исследуемый период варьировало от 0.01×10^3 до 46×10^3 КОЕ/мл. Численность в воде рек БГКП достигала высоких значений: 0.2×10^3 – 1324×10^3 КОЕ/л. Эти показатели свидетельствуют о неблагоприятном санитарном состоянии большинства рек, в которых БГКП превышало норму 5000 КОЕ/л (СанПиН 2.1.3684-21).

В целом наибольшим развитием всех эколого-трофических групп бактериопланктона характеризовался городской участок р. Неглинки, в то время как наименьшая численность была характерна для загородных участков р. Лососинки и р. Неглинки, руч. Железного и р. Лижмы.

Структура связей между химическими и микробиологическими показателями речных вод

Для целей микробиологической индикации качества воды притоков Онежского озера с учетом многофакторного воздействия на их экосистемы актуальной задачей стало выявление факторов среды, влияющих на количественные показатели разных эколого-трофических групп бактерий.

Состав воды 12 притоков характеризовался широким диапазоном как природных (цветность воды, содержание железа, ХПК, рН), так и антропогенно обусловленных химических показателей (БПК₅, взвешенные вещества, общий фосфор) (см. табл. 1, 2). Это обстоятельство позволило на фоне большой изменчивости химического состава воды речных вод выявить химические показатели, с которыми могла быть связана численность разных групп бактерий в воде.

Анализ данных с помощью метода главных компонент показал, что собственные значения трех первых главных компонент, которые отразили 74 % общей изменчивости признаков, превышали 1, что позволило определить их как значимые (табл. 4). Значимый вклад в первую главную компоненту (более 0.7 по модулю) внесли все группы бактерий и величина БПК₅, отражающая содержание легкоминерализуемого ОВ, поступающего с ливневыми городскими стоками. Следовательно, количество бактерий в воде притоков отражает влияние антропогенного фактора.

Таблица 4. Распределение факторных нагрузок в главные компоненты при изучении связей между гидрохимическими и микробиологическими показателями притоков Онежского озера

Исходные показатели	Первая главная компонента	Вторая главная компонента	Третья главная компонента
Содержание кислорода	0.5	0.4	-0.1
pH воды	-0.1	0.8	0.5
Цветность	0.2	-0.7	-0.6
ХПК	0.1	-0.7	0.5
БПК ₅	-0.8	0.1	-0.1
Взвешенное вещество	-0.3	0.2	-0.5
Общий фосфор	0.2	-0.3	0.8
Общая численность бактерий	-0.7	0.4	0.0
Бактерии группы кишечной палочки	-0.7	0.0	-0.1
Общее микробное число	-0.9	-0.1	0.1
Сапрофитные бактерии	-1.0	-0.1	0.1
Олигокарбофильные бактерии	-1.0	-0.1	0.1
Фенолрезистентные бактерии	-1.0	-0.1	0.1
Углекислородокисляющие бактерии	-1.0	-0.1	0.1
Дисперсия	6.48	2.14	1.79
Доля в общей дисперсии, %	46	15	13

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые факторные нагрузки признаков.

Во вторую пляду вошли показатели, характеризующие влияние заболоченного водосбора (pH, цветность, ХПК), при этом ни одна группа бактерий не внесла значимого вклада во вторую компоненту (см. табл. 4). Это доказывает отсутствие прямого влияния природного фактора на количественные показатели бактериопланктона.

В третью главную компоненту со значимым вкладом вошел один показатель – содержание общего фосфора (см. табл. 4). Этот элемент поступает в реки в основном с ливневыми водами. Кроме того, фосфор может поступать в водоемы с гумусовым веществом в форме железосвязанного фосфора (Лозовик, 2006). Принимая во внимание, что показатели содержания фосфора и цветность вошли в третью главную компоненту с противоположными знаками, можно считать, что соединения фосфора в речных водах имеют антропогенное происхождение.

Дополнительно был проведен корреляционный анализ для изучения связей между микробиологическими и гидрохимическими показателями. Оказалось, что достоверные значения коэффициента корреляции Спирмена были обнаружены для микробиологических данных и величины БПК₅ (основной показатель влияния антропогенных источников загрязнения) (табл. 5). Важно учитывать, что величины БПК₅ отражают потребление кислорода, который расходуется не только на химическое окисление органического вещества, но в большей степени потребляется аэробными организмами в процессе их жизнедеятельности, в т. ч. бактериями. В связи с этим выявленная корреляция закономерно отражает реакцию бактерий на присутствие легкоминерализуемых веществ, которые, как

правило, являются компонентами антропогенных стоков.

Таблица. 5. Коэффициенты корреляции Спирмена между микробиологическими показателями и величиной БПК₅

Показатель	ОЧБ	БГКП	ОМЧ	СБ	ОКБ	ФРБ	УОБ
ОЧБ							
БГКП	0.62						
ОМЧ	0.69	0.87					
СБ	0.57	0.67	0.75				
ОКБ	0.64	0.73	0.75	0.84			
ФРБ	0.60	0.63	0.70	0.77	0.74		
УОБ	0.46	0.60	0.66	0.70	0.71	0.69	
БПК ₅	0.48	0.62	0.65	0.56	0.61	0.57	0.49

Примечание. Все коэффициенты значимо отличаются от нуля ($p < 0.05$).

Это позволяет применить для притоков Онежского озера общепринятые классификации качества воды (Руководство..., 1992; Оксийок и др., 1993; Виноградов и др., 2001), предназначенные для выявления антропогенно измененных участков водных объектов по микробиологическим показателям.

Итоги оценки качества воды притоков Онежского озера по микробиологическим и гидрохимическим показателям с использованием экологической классификации качества поверхностных вод суши (Оксийок и др., 1993) представлены на рис. 2. В анализ вошли гидрохимические показатели, отражающие влияние антропогенной нагрузки: БПК₅, содержание нефтепродуктов и взвешенных веществ, биогенных элементов, насыщение воды кислородом. Из микробиологических показателей были использованы показатели численности ОЧБ, СБ и БГКП.

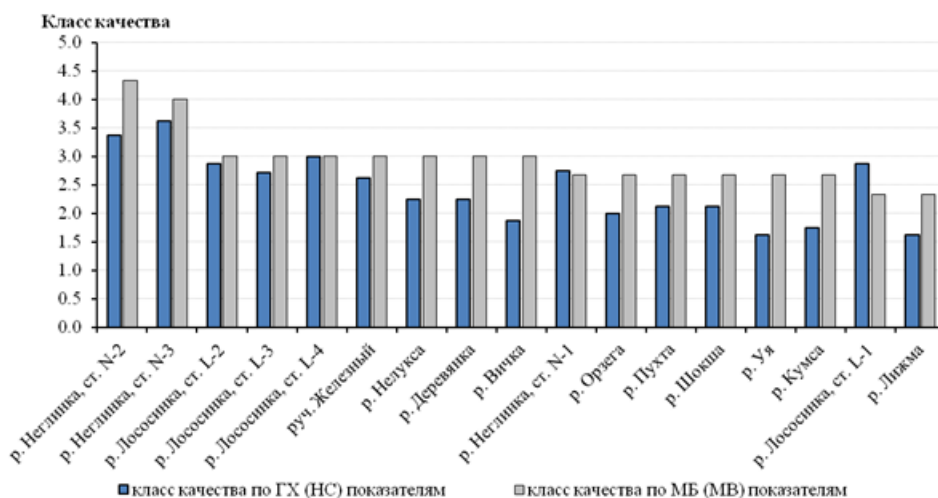


Рис. 2. Диаграмма классов качества воды на различных станциях по микробиологическим (МБ) и гидрохимическим (ГХ) показателям

Fig. 2. Diagram of water quality classes at various stations according to microbiological

(MB) and hydrochemical (HC) indicators

Класс качества воды для каждой станции рассчитывался как средняя величина на основании баллов по группе гидрохимических показателей, и отдельно – по группе микробиологических показателей. Станции изученных притоков ранжировались от максимального класса качества по микробиологическим показателям к минимальному (см. рис. 2). Таким образом, были установлены наиболее загрязненные участки рек по двум группам изученных показателей. Наибольшую загрязненность и по химическим, и по микробиологическим показателям проявили городские участки рек Лососинки и Неглинки, а также руч. Железный. Городские участки рек Лососинки и Неглинки оказались непригодными для рекреационного использования. Наиболее чистыми оказались приустьевые станции рек Лижмы, Кумсы и фоновый участок р. Лососинки.

Коэффициент корреляции Спирмена между баллами классов качества вод, рассчитанными по гидрохимическим и микробиологическим показателям, составил 0.6 и был значимым ($p < 0.05$). Таким образом, проведенный анализ подтверждает применимость общепринятых классификаций по микробиологическим показателям для оценки качества воды высокоцветных притоков Онежского озера, находящихся под антропогенным влиянием.

Обсуждение

Проблема поиска связей между показателями состояния биоты и химическим составом окружающей среды является одной из наиболее актуальных в экологических исследованиях. В биомониторинге индикаторная значимость биологических показателей выясняется на основе получения зависимости «доза – эффект». В свою очередь, выявление зон антропогенного воздействия на основе биоиндикации получает доказательную основу, когда отклик биоты подтверждается закономерным изменением химического состава среды.

Сложность изучения связей между состоянием биоты и химическими показателями определяется многофакторностью воздействия, которая прослежена на примере водотоков Карелии. Их особенный химический состав связан с повышенной заболоченностью водосборных территорий, с которых поступают гумусовые вещества. Высокие концентрации аллохтонных органических веществ сопоставимы с содержанием минеральных компонентов. В таких водах основной вклад в кислотность среды вносят гумусовые кислоты (Лозовик, 2013). Присутствие гумусовых веществ в воде может нивелировать действие антропогенных факторов на водные организмы. Выявить причины интенсивного развития разных групп бактерий в загрязняемых притоках Онежского озера позволило одновременное проведение химических и микробиологических исследований. Применение многомерного анализа позволило статистически доказать основную роль антропогенного фактора, а именно – поступающих с ливневыми стоками легкоминерализуемых органических веществ, которые и определили высокие концентрации бактерий в речных водах. Эти процессы наиболее четко прослеживались в реках на урбанизированных территориях, в черте г. Петрозаводска.

Развитием исследований в этом направлении следует считать проведение лабораторных экспериментов, которые позволят детально изучить совместное воздействие на водные бактерии веществ природного и антропогенного происхождения с учетом влияния температурного фактора.

Заключение

Основные проблемы биоиндикации состояния притоков Онежского озера связаны с

геохимическими особенностями их водосборных территорий. Высокая заболоченность водосборов определяет поступление в реки большого количества гумусовых веществ и связанных с ними микроэлементов. Биоиндикация антропогенного воздействия на притоки Онежского озера была выполнена с учетом особенностей геохимической обстановки – присутствия в воде комплекса веществ (гуминовые и фульвокислоты, железо, повышенная концентрация водородных ионов), которые сами по себе могут оказывать угнетающее воздействие на биоту.

В ходе наших исследований было выявлено, что микробиологические показатели не связаны с фоновыми компонентами химического состава речных вод, отражающими влияние заболоченных водосборов. В то же время установлено, что в высокоцветных речных водах основным показателем, определяющим уровень развития бактерий, является высокое содержание легкоминерализуемого органического вещества, определяемого по величине БПК₅. Это позволило связать количество бактерий в воде с действием антропогенного фактора. Таким образом, была доказана применимость общепринятых микробиологических методик для оценки качества воды высокоцветных притоков Онежского озера.

Библиография

- Алекин О. А., Семенов А. Д., Скопинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика, Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Виноградов Г. А., Жариков Г. П., Березина Н. А., Лаптева Н. А., Клайн Н. П., Курбатова С. А., Маврин А. С. Разработка региональной классификации качества вод на основе мониторинга р. Которосль и ее притоков // Экологические проблемы Верхней Волги: Коллективная монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. С. 210–221.
- ГОСТ 31942-2012. Вода. Отбор проб для микробиологического анализа. М., 2013. 27 с.
- Зобкова М. В., Галахина Н. Е. Содержание и распределение фенолсодержащих соединений в Онежском озере // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: 1-я Междунар. конф., 11–15 сентября 2017 г.: Материалы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 88–93.
- Коросов А. В. Экологические приложения компонентного анализа: Учебное пособие. М.: Наука, 1989. 288 с.
- Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. М., 2006. 59 с.
- Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583.
- Лозовик П. А., Сабылина А. В., Рыжаков А. В. Химический состав озерных вод // Озера Карелии: Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. С. 30–36.
- Лозовик П. А., Шкиперова О. Ф., Зобков М. Б., Платонов А. В. Геохимические особенности поверхностных вод Карелии и их классификация по химическим показателям // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2006. № 9. С. 130–143.
- МУК 4.2.3690-21. Изменения № 2 в МУК 4.2.1018-01 «Санитарно-микробиологический анализ питьевой воды» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере

защиты прав потребителей и благополучия человека 1 марта 2021 г.) // ГАРАНТ.РУ. Информационно-правовой портал. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400635467/> (дата обращения: 10.03.2023).

МУК 4.2.3721-21. Изменения № 3 в МУК 4.2.1884-04 «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 15 декабря 2021 г.) // ГАРАНТ.РУ. Информационно-правовой портал. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403306515/> (дата обращения: 10.03.2023).

Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.

ПНД Ф 14.1:2.106–97. Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфора общего в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом после окисления персульфатом. URL: https://www.chemanalytica.ru/f/fosfor_obshchiy.pdf (дата обращения: 10.03.2023).

ПНД Ф 14.1:2.110–97. Методика выполнения измерений содержаний взвешенных веществ и общего содержания примесей в пробах природных и очищенных сточных вод гравиметрическим методом. URL: https://www.chemanalytica.ru/f/vzveshennyye_veshchestva.pdf (дата обращения: 10.03.2023).

ПНД Ф 14.1:2.4.248–07. Методика измерений массовых концентраций ортофосфатов, полифосфатов и фосфора общего в питьевых, природных и сточных водах фотометрическим методом. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293773/4293773265.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).

РД 52.24.427-2013. Массовая концентрация цинка, меди, железа, марганца и никеля в водах. Методика измерений атомно-абсорбционным методом с атомизацией в пламени. Ростов-на-Дону, 2013. 26 с.

РД 52.24.476-2007. Массовая концентрация нефтепродуктов в водах. Методика выполнения измерений ИК-фотометрическим методом. Ростов-на-Дону, 2007. 33 с.

Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов: Лабораторное руководство. Л.: Наука, 1974. 196 с.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. А. Д. Семенова. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.

СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. URL: <https://base.garant.ru/400289764/> (дата обращения: 10.03.2023).

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология. Методы, критерии, решения: В 2 кн. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 618 с.

Handbook of methods in aquatic microbial ecology / Ed. by Paul F. Kemp, Barry F. Sherr, Evelin B. Sherr, Jonatan J. Cole. Washington: Levis Publishers, CRC Press LLC., 1993. 800 p.

James R. T. Microbiology and chemistry of acid lakes in Florida: I. Effects of drought and

post-drought conditions // *Hydrobiologia*. 1991a. Vol. 213, № 3. P. 205–225.

James R. T. Microbiology and chemistry of acid lakes in Florida: II. Seasonal relationships // *Hydrobiologia*. 1991b. Vol. 213, № 3. C. 227–240.

Jones R. I., Salonen K., De Haan H. Phosphorus transformations in the epilimnion of humic lakes: abiotic interactions between dissolved humic materials and phosphate // *Freshwater Biology*. 1988. Vol. 19, № 3. P. 357–369. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1988.tb00357.x>.

Kisand V., Rocker D., Simon M. Significant decomposition of riverine humicrich DOC by marine but not estuarine bacteria assessed in sequential chemostat experiments // *Aquatic microbial ecology*. 2008. Vol. 53, № 2. P. 151–160.

Steinberg C. E. W., Kamara S., Prokhotsjaya V. Y., Manusadzanas L., Karasuova T. A., Timofeyev M. A., Jie Z., Paul A., Meinelt T., Farjalla V. F., Matsuo A. Y. O., Burnison B. K., Menzel R. Dissolved humic substances – ecological driving forces from the individual to the ecosystem level? // *Freshwater Biology*. 2006. Vol. 51, № 7. P. 1189–1210. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01571.x>.

Tranvik L. J., Höfle M. G. Bacterial Growth in Mixed Cultures on Dissolved Organic Carbon from Humic and Clear Waters // *Applied and Environmental Microbiology*. 1987. Vol. 53, № 3. P. 482–488.

Visser S. A. Physiological action of humic substances on microbial cells // *Soil Biology and Biochemistry*. 1985. Vol. 17, № 4. C. 457–462. URL: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90009-4).

Zimmermann R., Iturriaga R., Becker-Birck J. Simultaneous determination of the total number of aquatic bacteria and the number thereof involved in respiration // *Applied and Environmental Microbiology*. 1978. Vol. 36, № 6. P. 926–935.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

THE POSSIBILITY OF USING MICROBIOLOGICAL INDICATORS TO ASSESS THE STATE OF WATERCOURSES WITH HIGH WATER COLOR (ON THE EXAMPLE OF TRIBUTARIES OF LAKE ONEGA)

MAKAROVA
Elena Mikhailovna

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (NWPI KarRC RAS) (Aleksander Nevsky st., 50, Petrozavodsk, 185030 Republic of Karelia, Russia), emm777@bk.ru

KALINKINA
Natalia Mikhailovna

D.Sc., Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (NWPI KarRC RAS) (Aleksander Nevsky st., 50, Petrozavodsk, 185030, Republic of Karelia Russia), cerioda@mail.ru

SABYLINA
Albina Vasilyevna

Ph.D., Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (NWPI KarRC RAS) (Aleksander Nevsky st., 50, Petrozavodsk, 185030, Republic of Karelia Russia), nwpi.karelia@yandex.ru

Keywords: small rivers of Lake Onega, hydrochemical composition, bacterial plankton, water quality assessment, principal component analysis

Summary: The article presents the results of studies of hydrochemical and microbiological indicators of the tributaries located on the southwestern, northwestern and northern shores of Lake Onega. The chemical composition of most of the studied watercourses is formed under the influence of a swampy catchment area (high color indices, iron content) and anthropogenic load. It is known that the content of humus substances can reduce the availability of heavy metals for biota, change the permeability of the cell membrane, which ultimately can modify the influence of the anthropogenic factor. Biota, and in particular bacterial plankton, is able to react differently to the presence of humus substances in water, which can affect the assessment of water quality according to generally accepted classifications developed for transparent reservoirs. Using the principal component analysis, the absence of the influence of swampy catchment areas on the river microbiota was shown. The leading role of the anthropogenic factor in the quantitative development of bacterial plankton in the tributaries of Lake Onega and the possibility of using microbiological indicators to assess the state of small rivers with high water color are proved.

Received on: 31 August 2023
Published on: 05 October 2023