

В.В. МАЛЬНИК, А.Н. СУТУРИН, А.С. ГОРШКОВА, Ю.Р. ШТЫКОВА, О.А. ТИМОШКИН

Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия,
malnik80@mail.ru, san@lin.irk.ru, kovadlo@lin.irk.ru, julis83@yandex.ru, tim@lin.irk.ru

КАЧЕСТВО ВОДЫ МЕЛКОВОДНОЙ ЗОНЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО САНИТАРНО-МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Проведено широкомасштабное исследование, направленное на характеристику пространственно-временного распределения санитарно-микробиологических показателей качества воды мелководной прибрежной зоны оз. Байкал. Пробы воды отбирались по всему периметру озера в течение нескольких лет (с 2012 по 2016 г.) и в 2020 г. (общее количество, n = 450). Выявлено, что при сравнении численности в придонных и поверхностных слоях воды при общей глубине в 1 м в целом концентрация санитарно-показательных бактерий была выше в поверхностных слоях воды. Динамика показателей качества воды, определяемых с мая по ноябрь на примере мониторинговых станций в поселках Листвянка и Большие Коты, по статистическим расчетам в большинстве случаев не выявила существенных различий численности фекальных индикаторных бактерий в разные месяцы исследования. Результаты четырех кругобайкальских экспедиций по одним и тем же станциям в июне и сентябре 2015 и 2016 гг. также показали отсутствие существенных различий с точки зрения периода отбора проб. Градиент концентрации санитарно-показательных бактерий от уреза воды до 100 м от берега имел строгую тенденцию в сторону уменьшения количества данных микроорганизмов в направлении от берега к глубоководной части озера. Выявлен район отбора проб, в котором отмечены концентрации индикаторных бактерий, значительно превышающие установленные для них нормативы (СанПиН 2.1.5.980-00). Таким местом оказался пос. Хужир. В прибрежной воде у поселков Сахюрта и Култук концентрации фекальных индикаторных бактерий оказались на грани ПДК. Эти данные свидетельствуют о постоянном и значительном загрязнении воды в прибрежной зоне в местах, находящихся рядом с населенными пунктами, в которых преимущественно развит туризм (повышена рекреационная активность).

Ключевые слова: прибрежная зона, фекальные индикаторные бактерии, энтерококки, термотолерантные колиформные бактерии, распределение бактерий.

V.V. MALNIK, A.N. SUTURIN, A.S. GORSHKOVA, Yu.R. SHTYKOVA, O.A. TIMOSHKIN

Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia,
malnik80@mail.ru, san@lin.irk.ru, kovadlo@lin.irk.ru, julis83@yandex.ru, tim@lin.irk.ru

WATER QUALITY IN THE SHALLOW ZONE OF LAKE BAIKAL AS DEDUCED FROM SANITARY AND MICROBIOLOGICAL INDICATORS

A wide-scale investigation providing insights into the spatial and temporal distribution of sanitary and microbiological indicators of water quality was undertaken in the shallow nearshore zone of Lake Baikal. Water samples were collected along the entire lake perimeter during several years, from 2012 to 2016, and in 2020 (total number, n = 450). Comparison of the abundance of fecal indicator bacteria in the bottom and surface waters at a total depth of 1 m showed that the concentration of sanitary indicator bacteria was generally higher in the surface water layers. The dynamics of water quality indicators as determined from May to November at the monitoring stations in the villages of Listvyanka and Bol'shie Koty did not reveal, according to statistical calculations, any substantial differences in the number of fecal indicator bacteria in most cases for different months of this study. Results of four circum-Baikal surveys at the same stations in June and September 2015 and 2016 also showed no notable differences in terms of the period of sampling. The concentration gradient of the fecal indicator bacteria 100 m from the water edge exhibited an consistent decrease of these microorganisms with distance from the shore towards deeper parts of the lake. An area of sampling was revealed, in which the concentrations of fecal indicator bacteria exceeded considerably the regulatory standards (SanPiN 2.1.5.980-00). The village of Khuzhir was such a site. In the shallow water at the villages of Sakhyurta and Kultuk, the concentrations of fecal indicator bacteria were on the verge of maximum permissible concentration. These data provided evidence of constant and significant water pollution in the nearshore zone adjacent to settlements characterized largely by touristic activities (the recreational activity is increased).

Keywords: coastal zone, fecal indicator bacteria, enterococci, thermotolerant coliform bacteria, bacterial distribution.

ВВЕДЕНИЕ

Ряд исследований последних лет указывает на развитие экологического кризиса на оз. Байкал [1–3]. Его причины, как мы полагаем, связаны с антропогенным воздействием на прибрежную зону озера: сброс неочищенных (как в пос. Бабушкин и г. Слюдянка) или недостаточно очищенных (г. Северобайкальск) сточных вод, а также отсутствие очистных сооружений при большой нагрузке (туризм) на некоторые прибрежные населенные пункты, представляющие собой туристические центры (поселки Листвянка, Хужир, Сахюрта и др.). Попадая в прибрежную зону озера, неочищенные сточные воды привносят в значительных концентрациях санитарно-показательные бактерии (СПБ), органические вещества, биогенные и другие химические элементы, нарушая природное функционирование экосистемы. В ряде сообщений приводятся данные о значительной биомассе не типичных для Байкала водорослей рода *Spirogyra* в прибрежной зоне в различных его котловинах [2–4] вследствие увеличения концентраций биогенных элементов в воде литоральной зоны и превышения нормативов качества воды по содержанию фосфатов, нитратов, нитритов и аммония рядом с населенными пунктами со значительной рекреационной нагрузкой, например, в пос. Листвянка [1, 5, 6]. Для подтверждения наших предположений относительно высоких антропогенных нагрузок было необходимо провести мониторинговое исследование прибрежной зоны всего озера по его периметру и выявить акватории с превышениями нормативов по санитарно-микробиологическим показателям. Они четко свидетельствуют о попадании в озеро хозяйственно-бытовых или фекальных вод, связанных с жизнедеятельностью людей и сквозь почву просачивающихся в его прибрежную зону. Согласно основным регламентирующим документам Российской Федерации, в водах, используемых для рекреации, количество термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ) не должно превышать 100 КОЕ/100 мл, энтерококков — 50 КОЕ/100 мл [7, 8]. Самая распространенная, многочисленная (до 80 % от общей численности) и индикаторная бактерия — кишечная палочка — относится к группе ТКБ.

Исследование санитарно-бактериологических показателей также необходимо для того, чтобы обезопасить население от возможных вспышек кишечных инфекций при рекреационном использовании прибрежных вод оз. Байкал [9]. Попадая в озеро, сточные воды сильно разбавляются, концентрации химических элементов практически укладываются в естественный диапазон изменений гидрохимических параметров, что делает их не очень информативным показателем качества воды. В этом случае биологический компонент антропогенного влияния приобретает первостепенное значение по сравнению с гидрохимическим [10]. При антропогенной нагрузке на экосистему озера аллохотная микрофлора, не типичная для самого Байкала, может влиять на состав литофильных компонентов экосистемы прибрежной зоны оз. Байкал (микромитеты, накипные и листоватые лишайники), на которых обычно поселяются литофильные бактерии, губки и эндемичные водоросли [10]. Продолжительный ряд периодических наблюдений позволяет выявить интенсивность загрязнения акватории озера по санитарно-микробиологическим показателям, диапазон их изменений в сезонном и межгодовом аспектах, а также выяснить тенденции в улучшении или ухудшении качества воды по данным показателям.

Цель представленной работы — характеристика качества воды в прибрежной зоне крупнейшего резервуара пресной воды на планете — оз. Байкал по санитарно-микробиологическим показателям. Оценка проведена во всех его котловинах.

В задачи исследования входило изучение сезонной и межгодовой динамики СПБ в воде прибрежной зоны оз. Байкал.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб. Объектом исследования стало оз. Байкал (рис. 1), располагающееся в центральной части Азии — между 55°46' и 51°29' с. ш. Его длина 636 км, наибольшая ширина 79,5 км, а наименьшая — 25 км. Длина береговой линии более 2000 км, площадь водного зеркала 31 500 км² [11]. Станции отбора проб спланированы так, чтобы отразить все типы населенных пунктов, расположенных на побережье озера, включая как небольшие, так и крупные поселки, а также города. Кроме того, часть станций отбора проб находилась в труднодоступных районах побережья Байкала. География станций включала локации из всех районов Иркутской области и Республики Бурятия, прилегающих к озеру: Иркутского, Слюдянского, Ольхонского, Баргузинского, Северо-Байкальского и Прибайкальского.

Пробы отбирали в безледный период в 2012–2016 и 2020 гг. Забор поверхностной и придонной воды в прибрежной зоне оз. Байкал производили в штилевую погоду согласно соответствующим нормативным документам [12].



Рис. 1. Схема озера Байкал с обозначением станций отбора проб.

Все работы выполняли либо с использованием стерильных шприцев Жане объемом 150 мл для отбора поверхностных слоев воды, либо шприцев, закрепленных на шесте [13], для отбора придонных байкальских вод с глубины 1 м. Кроме того, на некоторых станциях взяты образцы воды на удалении до 100 м от уреза. Для сравнения был проведен отбор проб поверхностной воды с глубоководных станций (см. рис. 1). Пробы сливали в стерильные стеклянные флаконы объемом 250 мл, помещали в сумку-холодильник с хладагентами и доставляли в лабораторию. Далее их размещали в стационарном холодильнике до начала аналитических исследований. Период времени от момента отбора проб до начала проведения анализа не превышал 6 ч. Температуру и электропроводность в местах пробоотбора измеряли с помощью портативного термометра (Hogiba), pH — с помощью портативного рН-метра (Hanna Instruments HI98127 рНер 4).

Анализ проб воды. Обнаружение, подсчет численности исследуемых групп бактерий и интерпретацию результатов проводили, руководствуясь МУК 4.2.1884-04 [7] и ГОСТ 24849-2014 [14], используя метод мембранной фильтрации на нитроцеллюлозных фильтрах с диаметром пор 0,45 мкм.

Количество термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ) определяли на дифференциально-диагностической среде Эндо с последующей проверкой типичных лактозоположительных колоний на способность ферментировать лактозу до кислоты и углекислого газа при $44 \pm 0,5$ °C [7]. Предварительно для изолированных колоний, проросших на фильтрах и выращенных на чашках Петри с питательной средой, выполняли оксидазный тест для определения того, продуцируют ли они определенные цитохром с-оксидазы. Количество энтерококков фекального (*Enterococcus faecalis*) и фециум (*E. faecium*) определяли на селективном агаре Slanetz and Bartley Medium (производство «Himedia» № M612) и Bile Esculine Azide Agar (производство «Himedia» № M493) [14].

Анализ данных. Статистический анализ выполняли с использованием программного обеспечения PSPP (<http://www.gnu.org/software/pspp/>). Количественные данные по СПБ в прибрежной зоне на одной и той же станции, но в разные даты отбора, были протестированы с помощью тестов Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилкса для проверки распределения по нормальному закону. Для

сравнения уровней и поиска различий СПБ в поверхностном и придонном слоях на разных участках использовался непараметрический критерий Манна–Уитни, а для поиска различий между разными станциями — дисперсионный анализ Краскела–Уоллиса. Взаимосвязь между качеством воды в прибрежной зоне по санитарно-бактериологическим показателям и численностью населения оценивали с помощью корреляционного анализа. Уровень значимости p был установлен равным 0,05. Коэффициент вариации, показывающий степень изменчивости по отношению к среднему показателю выборки, определяли как отношение стандартного отклонения к среднему.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение СПБ в поверхностных и придонных слоях воды в прибрежной зоне. Сравнение численности СПБ в поверхностных и придонных слоях воды прибрежной зоны показало, что в поверхностном слое СПБ в целом обнаружены в большем количестве, чем у дна (для ТКБ $p < 0,05$, для энтерококков $p < 0,0001$, общее количество образцов, $n = 288$). Важно отметить, что распределение микроорганизмов в поверхностных и придонных слоях статистически не зависело от таких показателей, как температура воды, электропроводность и рН ($p < 0,05$), тогда как численность СПБ у поверхности и у дна имела значимые различия ($p < 0,05$). Также необходимо подчеркнуть, что результаты количественного анализа СПБ на отдельных станциях отбора проб с меньшей выборкой могут отличаться от общей тенденции, о чем упоминалось выше. Так, анализ результатов сравнения численности бактерий в поверхностных и придонных слоях воды в районе пос. Большие Коты ($n = 40$) выявил значимые различия по содержанию энтерококков, но не ТКБ. В районе пос. Листвянка ($n = 36$) различий между нормируемыми показателями в поверхностном и придонном слоях найдено не было ($p > 0,5$).

Распределение СПБ в поверхностных слоях воды на разном удалении от берега. Градиент численности СПБ от уреза воды до станции, расположенной в 50 м от берега, значительно уменьшался по направлению к глубоководной части озера ($n = 89$). Фоновые станции ($n = 3$), расположенные в центре озера на равном удалении от его противоположных берегов во всех трех котловинах, демонстрировали полное отсутствие СПБ, что связано с отсутствием источника загрязнения в этих районах.

Особенности сезонной и межгодовой динамики СПБ на двух стандартных станциях мониторинга. Динамику показателей качества воды за период 2012–2016 гг. отслеживали на мониторинговых станциях в районе поселков Большие Коты и Листвянка с конца мая по ноябрь, но наиболее часто оценка проводилась в июне и сентябре. Статистические расчеты в большинстве случаев не выявили существенных различий в сезонной динамике исследуемых показателей. Исключением оказалась численность ТКБ в прибрежной воде пос. Листвянка, где выявлен тренд увеличения данного показателя в течение летне-осеннего периода. Результаты четырех кругобайкальских экспедиций на одних и тех же станциях в июне и сентябре 2015 и 2016 гг. также показали отсутствие существенных различий в межгодовой динамике СПБ.

Районы озера Байкал с превышением нормативов СанПиН 1.2.3685-21 и МУК 4.2.1884-04. Общепризнано, что ТКБ и энтерококки являются основными санитарно-показательными микроорганизмами [15]. В Российской Федерации, согласно СанПиН 1.2.3685-21 [8], ТКБ рассматриваются как один из определяющих нормируемых показателей качества вод водоемов. Ориентировочные нормы по количеству энтерококков регламентированы в МУК 4.2.1884-04 [7]. Присутствие в воде этих микроорганизмов в количестве, превышающем нормативные значения, обычно свидетельствует о сравнительно недавнем фекальном загрязнении и потенциальной эпидемиологической опасности.

Периодические наблюдения в одних и тех же районах прибрежной зоны оз. Байкал показали неравномерное распределение ТКБ (рис. 2). Такая особенность экологии СПБ, вероятно, связана с неравномерным уровнем поступления этих микроорганизмов в водоем. Это обусловлено разной численностью туристов в определенные месяцы, если исследованные места расположены вблизи населенных пунктов, или иными причинами, если точки отбора проб находятся на удалении от населенных пунктов. Так, коэффициент вариации количества ТКБ и энтерококков в одной и той же точке отбора оказался очень высоким. В среднем этот показатель для каждой исследованной станции отбора в прибрежной зоне оз. Байкал составил 2,15.

Мониторинг качества воды по микробиологическим параметрам в крупном и довольно загрязненном оз. Нойзидлер Зее (Австрия) показал, что коэффициент вариации количественного распределения СПБ на станциях имел более низкие показатели, чем на оз. Байкал, и составил в среднем 0,66. Причем, так же, как и в Байкале, на менее загрязненных участках открытой воды оз. Нойзидлер

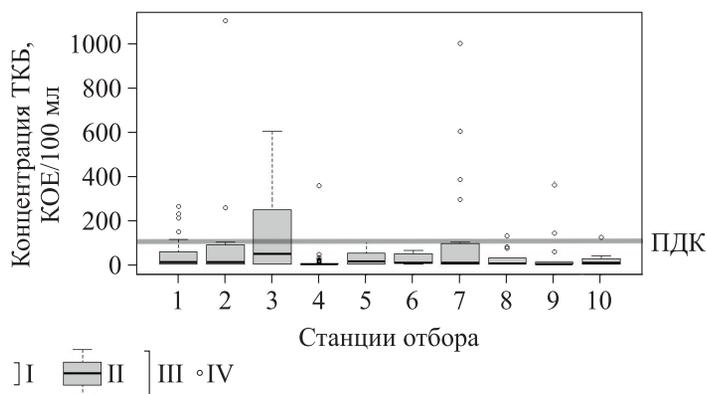


Рис. 2. Суммарное распределение термотолерантных колиформных бактерий в оз. Байкал на разных станциях отбора.

Станции отбора (ось X): 1 — пос. Листвянка, 2 — пос. Сахюрта, 3 — пос. Хужир, 4 — пос. Большие Коты, 5 — бухта Сеногда, 6 — пос. Большое Голоустное, 7 — пос. Култук, 8 — пос. Заречный, 9 — пос. Максимиха, 10 — г. Байкальск. I — значения выборки от 1 до 3 квартиля; II — медиана; III — границы усов — минимальное и максимальное значения по выборке, кратные 1,5-интерквартильному значению; IV — выбросы и экстремальные значения.

Зее средние значения СПБ были самыми низкими, а коэффициенты вариации самыми высокими (2,84 для кишечной палочки (*Escherichia coli*), 1,85 для энтерококков). Стабильно загрязненные участки акватории австрийского озера демонстрировали низкие значения коэффициента вариации и высокие средние значения индикаторных бактерий [16].

Тест Краскела–Уоллиса показал, что с точки зрения количества СПБ различия между отдельными участками статистически значимы ($p < 0,05$). Из всех изученных районов наиболее высокие показатели численности микроорганизмов мы наблюдали напротив поселков Хужир, Култук, Сахюрта, Листвянка. Полученные данные согласуются с ранее опубликованными работами, в частности для пос. Листвянка [5, 10, 17].

Сводная характеристика количества проведенных независимых съемок в разные месяцы и годы, количества анализированных образцов и полученные медианные, средние значения даны в табл. 1. В ней не приводятся данные для станций, где было проведено менее трех независимых отборов проб. Широкий диапазон колебания численности СПБ не позволяет дать характеристику района при небольшом объеме выборки. По данным от 01.01.2016, в центральной экологической зоне Байкальской природной территории было расположено 159 населенных пунктов, в которых проживает 145,287 тыс. чел. Из них городов численностью более 10 тыс. чел. всего три (Северобайкальск, Слю-

Таблица 1

Статистика по количеству образцов и распределению показателя качества воды ТКБ (термотолерантные колиформные бактерии, КОЕ/100 мл) в прибрежной мелководной зоне озера Байкал в летне-осенний период

Станция	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее	Кол-во независимых пробоотборов	Кол-во проб
пос. Хужир	0	600	48	167	8	18
пос. Култук	0	1000	8	119	6	25
пос. Сахюрта	0	1100	12	121	6	15
бухта Сеногда	0	106	13	30	4	7
бухта Песчаная	0	132	5	21	4	8
пос. Листвянка	0	267	5	33	17	75
г. Байкальск	0	128	7	19	7	22
пос. Большое Голоустное	0	156	4	20	6	16
о. Большой Ушканий	0	367	2	50	5	9
пос. Максимиха	0	364	0	28	5	22
пос. Большие Коты	0	354	0	6	17	113
мыс Елохин	0	22	1	5	3	5
пос. Заречный (г. Северобайкальск)	0	136	0	13	8	19
полигон «Березовый»	0	18	0	1	9	19
мыс Анохта	0	1	0	0	3	6
мыс Большой Солонцовый	0	8	0	1	6	13
мыс Ижимей	0	1	0	0	5	10

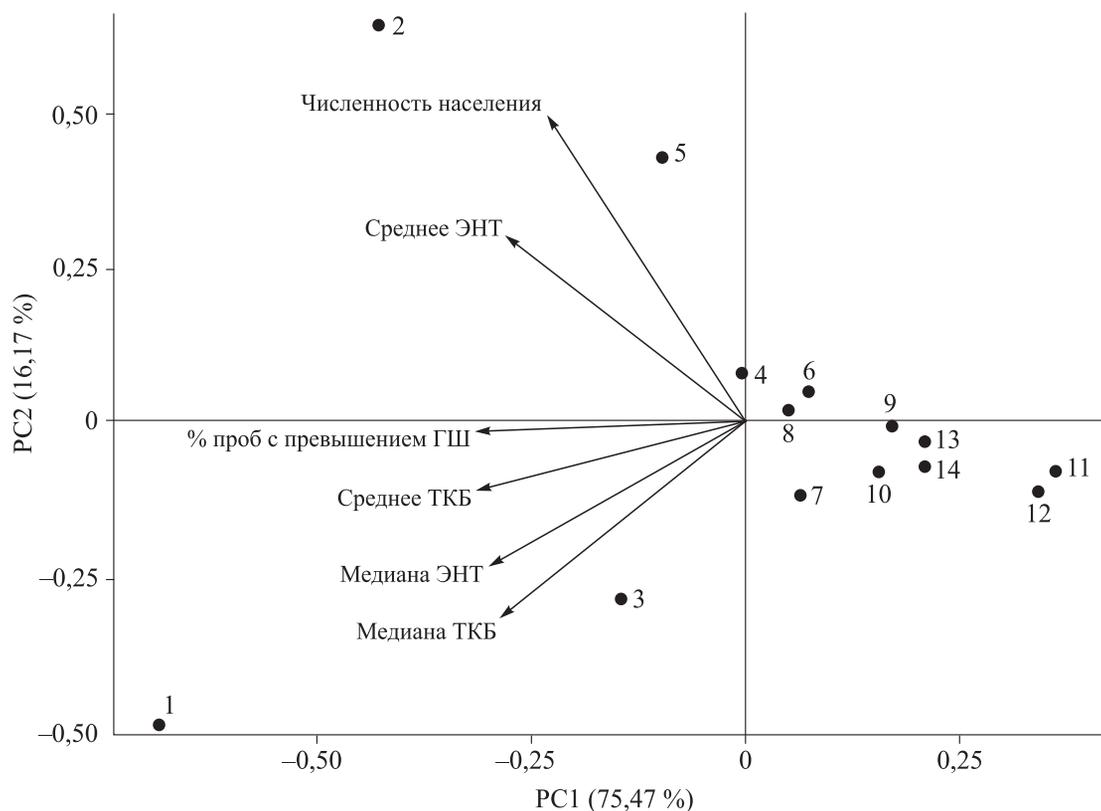


Рис. 3. График метода главных компонент с вариацией между станциями отбора проб по разным параметрам.

Станции отбора: 1 — пос. Хужир, 2 — пос. Култук, 3 — пос. Сахюрта, 4 — бухта Песчаная, 5 — пос. Листвянка, 6 — пос. Большое Голоустное, 7 — о. Большой Ушканий, 8 — пос. Максимиха, 9 — пос. Большие Коты, 10 — мыс Елохин, 11 — полигон «Березовый», 12 — мыс Анютха, 13 — мыс Большой Солонцовый, 14 — мыс Ижмей.

дьянка, Байкальск), крупных поселков с населением от 3,7 тыс. до 10 тыс. чел. — пять (Усть-Баргузин, Нижнеангарск, Бабушкин, Выдрино и Култук) [18]. В данной работе было оценено качество воды у 21 населенного пункта с населением от 56 чел. (пос. Большие Коты) до 23,2 тыс. человек (г. Северобайкальск). Таким образом, полученные данные представляют ценную в научном плане информацию, учитывающую распределение СПБ в зависимости от численности местного населения в прибрежном населенном пункте (рис. 3).

Взаимосвязь между качеством воды по санитарно-показательным критериям и трофическим уровнем вод. По данным гидрохимического анализа прибрежной воды (в приурезовой и придонной воде), проведенного И.В. Томберг и др. [19] по всему периметру озера в июне в 2013–2016 гг., выявлено, что концентрации фосфатов в июне были выше (до 0,011 мг P/дм³), чем в сентябре (менее 0,007 мг P/дм³). Суммарное содержание минеральных форм азота (аммонийной, нитратной и нитритной) в период исследования изменялось от 0,01 до 0,3 мг N/дм³. Как и для фосфатов, концентрации азота в июне оказались выше, чем в сентябре, что обусловлено внутригодовой динамикой содержания этих компонентов в байкальской воде и поступлением азота при затоплении береговой полосы в ходе повышения уровня озера [19]. Среднее за период наблюдений содержание минерального азота было выше в прибрежной воде у г. Байкальска, поселков Култук, Листвянка и Хужир. В районах с высокой антропогенной нагрузкой (Хужир, Максимиха, Сахюрта, Северобайкальск, Култук и др.) в прибрежной воде регистрировали достаточно высокие концентрации аммонийного азота (до 0,04 мг N/дм³), а в отдельные сезоны отмечали его преобладание над нитратами, что нехарактерно для хорошо аэрированных байкальских вод с высоким значением величины рН [19]. Таким образом, районы с повышенными показателями СПБ также различаются и по химическому составу.

Значительный объем наблюдений для пресноводных водоемов также показал, что такие показатели, как общий фосфор, азот, хлорофилл, имели положительную взаимосвязь с концентрацией колиформных бактерий и кишечной палочки [20].

Концентрации СПБ в прибрежной воде озер мира. Для сравнения полученных нами данных с аналогичными показателями для других регионов планеты мы приводим максимальные значения численности СПБ в прибрежной воде различных озер мира (табл. 2) [2, 16, 20–30]. По санитарно-микробиологическим показателям прибрежные воды оз. Байкал, в которых отмечалась максимальная численность СПБ 1100 КОЕ/100 мл в нашем исследовании, следует признать более чистыми в сравнении с озерами Флориды, Мичиганом, Танганьикой и Нойзидлер Зее, но более загрязненными в сравнении с озерами Гурон и Ладожское (см. табл. 2).

Возможные источники поступления СПБ в прибрежную зону оз. Байкал. Важно отметить, что численность населения в прибрежных поселках и качество воды озера по микробиологическим показателям имели прямую взаимосвязь (см. рис. 3). Коэффициент корреляции между процентом проб с превышением норматива по количеству СПБ и численностью населения в прибрежных населенных пунктах составил 0,6 ($p < 0,05$). Обнаруженная зависимость не касалась городских населенных пунктов с централизованной канализационной системой. Накопленные данные также позволяют определить вероятность, с которой можно прогнозировать превышение нормативов, установленных СанПиН 1.2.3685-21 [8]. Так, исходя из полученных наблюдений, вероятность превышения нормативов в районах озера Байкал у населенных пунктов может достигать 40 %, а вне населенных пунктов, как правило, она равна нулю.

Один из возможных источников поступления СПБ в прибрежные зоны представляют собой интестиниальные воды зоны заплеска [31]. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, в поровое пространство песчаных пляжей сквозь почву могут поступать загрязненные фекальными бактериями стоки от прибрежных домов [32]. В данной статье показано, что эти процессы наиболее интенсивно протекают после таяния снега и ливневых дождей. Во-вторых, эта территория — зона массовой рекреации, а также — излюбленное место для поиска добычи у птиц, медведей и т. д.

Ранее была предпринята попытка изучения закономерности распространения ТКБ и энтерококков в заплесковой зоне оз. Байкал [15]. Полученные данные показали сложность причинно-следственных взаимоотношений разных факторов, обуславливающих распространение СПБ. Прежде всего, выявлен неравномерный характер распределения СПБ в интестиниальных водах пляжей заплесковой зоны, а также прибрежной зоны самого озера. Выяснено, что интенсивность их загрязнения СПБ значительно зависит от места отбора проб и положительно коррелирует с акваториями прибрежных поселков, лишенных станций очистных сооружений [15].

Таблица 2

Концентрации санитарно-показательных микроорганизмов в прибрежной зоне разных озер

Озеро	Концентрация ТКБ (<i>Escherichia coli</i>)* или фекальных колиформ**, не более КОЕ/100 мл	Концентрация энтерококков, не более КОЕ/100 мл	Ссылка
Ахор (Гана, Африка)	9	—	[24]
Мичиган (юго-западный берег у 63 rd Street Beach)	200	—	[22]
Танганьика (Бурунди, Африка)	5000	—	[23]
Ладожское	46***	—	[25]
Озера Флориды	7400	—	[21]
Мичиган (Чикагский пляж на юго-западе озера)	100	—	[29]
Мичиган (залив Гранд Траверс)	4500	58	[30]
Байкал (залив Лиственничный)	320	—	[2]
Мичиган (пляжи рядом с Милуоки и Рацином)	1840	1920	[31]
Гурон	310	60	[32]
Нойзидлер Зее (Австрия, мелководное озеро)	6500	3100	[33]

Примечание. Прочерк — отсутствие данных.

* Кишечная палочка (*Escherichia coli*) составляет основную долю бактерий, входящих в группу термотолерантных колиформных бактерий [27].

** Фекальные колиформные бактерии [28].

*** В Ладожском озере определяли общие колиформные бактерии, которые по численности превышают или сопоставимы с термотолерантными колиформными бактериями.

На примере одного из Великих Американских озер — оз. Мичиган — установлено, что концентрации кишечной палочки в интерстициальной воде пляжей положительно коррелировали с ее содержанием в водах зоны рекреационной активности [33]. В этом же исследовании показано, что важными факторами, обуславливающими интенсивность загрязнения вод кишечной палочкой, являются солнечная радиация, температура воды и рН. Кроме того, выявлено, что береговые птицы были наиболее заметными источниками поступления кишечной палочки в воды рекреационной зоны [33].

Притоки оз. Байкал, протекающие в пределах прибрежных поселков, которые не имеют системы централизованного водоотведения, также испытывают высокую антропогенную нагрузку за счет поступления неочищенных вод [5, 17] и однозначно оказывают влияние на качество воды в прибрежной зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный статистический анализ большого количества периодических наблюдений позволил сделать следующие выводы. В результате антропогенной деятельности в воде прибрежной зоны оз. Байкал вблизи населенных пунктов формируются очаги неблагоприятной санитарно-бактериологической обстановки. Подтверждение этому — неудовлетворительное состояние прибрежных вод у поселков Хужир, Сахюрта и Култук, где качество воды по санитарно-микробиологическим показателям находится на пределе верхних значений ПДК. Эти данные свидетельствуют о нарушении нормативов по санитарно-микробиологическим показателям в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 [8] и МУК 4.2.1884-04 [7]. Выявленная нами сезонная и межгодовая изменчивость количественных показателей СПБ (кишечной палочки и энтерококков) явно свидетельствует о постоянном загрязнении и низком качестве поверхностных вод вблизи населенных пунктов, испытывающих сильное антропогенное влияние. Регулярные, междисциплинарные (в том числе — санитарно-микробиологические) исследования прибрежной зоны Байкала будут способствовать своевременному обнаружению зон загрязнения акватории, пониманию причин экологических нарушений и помогут принять правильные решения для стабилизации неблагоприятной экологической обстановки. Это поможет разработать долгосрочные стратегии для улучшения качества воды в прибрежной зоне оз. Байкал.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ и темы «Комплексные исследования прибрежной зоны озера Байкал: многолетняя динамика сообществ под воздействием различных экологических факторов и биоразнообразия; причины и последствия негативных экологических процессов» (0279–2021–0007). Сбор и анализ полевых материалов выполнены при финансовой поддержке проектов «Крупномасштабные изменения в экологии и биоразнообразии сообществ прибрежной зоны озера Байкал: междисциплинарное исследование, выявление причин, прогноз развития» (0345–2019–0009) и «Влияние изменяющихся природных и антропогенных факторов на биогеохимические процессы на каменистой литорали Байкала» (0345–2019–0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравцова Л.С., Ижболдина Л.А., Ханаев И.В., Помазкина Г.В., Домышева В.М., Кравченко О.С., Грачёв М.А. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в открытом Лиственничном заливе озера Байкал, как следствие локального антропогенного воздействия // Докл. Акад. наук (Общая биология). — 2012. — Т. 447, № 2. — С. 227–229.
2. Kravtsova L.S., Izhboldina L.A., Khanaev I.V., Pomazkina G.V., Rodionova E.V., Domysheva V.M., Sakirko M.V., Tomberg I.V., Kostornova T.Ya., Kravchenko O.S., Kupchinsky A.B. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal // Journ. Great Lakes Res. — 2014. — Vol. 40. — P. 441–448.
3. Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Moore M.V., Belykh O.I., Malnik V.V., Sakirko M.V., Shirokaya A.A., Bondarenko N.A., Domysheva V.M., Fedorova G.A., Kochetkov A.I., Kuzmin A.V., Likhnev A.G., Medvezhonkova O.V., Nepokrytykh A.V., Pasyukova E.M., Poberezhnaya A.E., Potapovskaya N.V., Rozhkova N.A., Sheveleva N.G., Tikhonova I.V., Timoshkina E.M., Tomberg I.V., Volkova E.A., Zaitseva E.P., Zvereva Yu.M., Kupchinsky A.B., Bukshuk N.A. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // Journ. Great Lakes Res. — 2016. — Vol. 42. — P. 487–497.
4. Kobanova G.I., Takhteev V.V., Rusanovskaya O.O., Timofeyev M.A. Lake Baikal ecosystem faces the threat of eutrophication // Int. Journ. Ecol. — 2016. — Vol. 2016. — P. 1–7.
5. Мальник В.В., Тимошкин О.А., Сутурин А.Н., Онищук Н.А., Сакирко М.В., Томберг И.В., Горшкова А.С., Забанова Н.С. Антропогенные изменения гидрохимических и санитарно-микробиологических показателей ка-

- чества воды в притоках Южного Байкала (зал. Лиственничный) // Водные ресурсы. — 2019. — Т. 46, № 5. — С. 533–543.
6. **Приказ** Министерства сельского хозяйства РФ № 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» [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения 07.04.2021).
 7. **Методические** указания 4.2.1884-04. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов [Электронный ресурс]. — <http://docs.cntd.ru/document/1200039680/> (дата обращения 07.04.2021).
 8. **Санитарные** правила и нормы 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]. — <http://docs.cntd.ru/document/1200006938/> (дата обращения 07.04.2021).
 9. **Cabelli V.J., Dufour A.P., McCabe L., Levin M.** Swimming association gastroenteritis and water quality // *Am. Journ. Epidemiol.* — 1982. — Vol. 115. — P. 606–616.
 10. **Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.В.** Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали озера Байкал (акватория пос. Листвянка) // *География и природ. ресурсы.* — 2016. — № 6. — С. 43–54.
 11. **Байкал.** Атлас / Ред. Г.И. Галазий. — М.: Изд-во СО РАН; Роскартография, 1993. — 160 с.
 12. **ГОСТ 31942-2012.** Вода. Отбор проб для микробиологического анализа [Электронный ресурс]. — <http://docs.cntd.ru/document/gost-31942-2012/> (дата обращения 07.04.2021).
 13. **Лухнёв А.Г., Тимошкин О.А.** Новый пробоотборник для придонной воды прибрежной зоны водоемов // *Изв. Ирк. ун-та. Сер. Биология. Экология.* — 2019. — Т. 28. — С. 101–107.
 14. **ГОСТ 24849-2014.** Вода. Методы санитарно-бактериологического анализа для полевых условий. [Электронный ресурс]. — <http://docs.cntd.ru/document/1200115427/> (дата обращения 07.04.2021).
 15. **Горшкова А.С., Мальник В.В., Косторнова Т.Я., Потапская Н.В., Тимошкин О.А.** Распределение бактерий — индикаторов загрязнения в заплесковой зоне озера Байкал // *География и природ. ресурсы.* — 2020. — № 2. — С. 90–98.
 16. **Hatvani I.G., Kirschner A.T.K., Farnleitner A.H., Tanos P., Herzig A.** Hotspots and main drivers of fecal pollution in Neusiedler See, a large shallow lake in Central Europe // *Environ. Sci. Pollut. Res.* — 2018. — Vol. 25. — P. 28884–28898.
 17. **Мальник В.В., Штыкова Ю.Р., Сутурин А.Н., Тимошкин О.А.** Влияние населенных пунктов на санитарно-микробиологическое состояние малых притоков и прибрежных вод на примере залива Лиственничный (Южный Байкал) // *География и природ. ресурсы.* — 2019. — № 4. — С. 84–92.
 18. **Воробьев Н.В., Емельянова Н.В., Воробьев А.Н., Валева О.В.** Расселение и динамика населения // *География и природ. ресурсы.* — 2016. — № 5. — С. 168–178.
 19. **Томберг И.В., Сакирко М.В., Моложникова Е.В., Тимошкин О.А.** Экологическая характеристика заплесковой зоны озера Байкал (по химическим компонентам) // *Фундаментальные проблемы экологии России. Тезисы докл. Всерос. науч. конф. (г. Иркутск – пос. Листвянка (оз. Байкал), 25 июня – 1 июля 2017 г.).* — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2017. — С. 193.
 20. **Hoyer M.V., Donze J.L., Schulz E.J., Willis D.J., Canfield Jr.D.E.** Total coliform and *Escherichia coli* counts in 99 Florida lakes with relations to some common limnological factors // *Lake Reservoir Manag.* — 2006. — Vol. 22, N 2. — P. 141–150.
 21. **Whitman R.L., Nevers M.B.** Microbes in beach sands: Integrating environment, ecology and public health // *Applied and Environmental Microbiology.* — 2003. — Vol. 69, N 9. — P. 5555–5562.
 22. **Niyoyitungiye L., Giri A., Ndayisenga M.** Assessment of coliforms bacteria contamination in Lake Tanganyika as bioindicators of recreational and drinking water quality // *South Asian Journ. of Research in Microbiology.* — 2020. — Vol. 6, N 3. — P. 9–16.
 23. **Amfo-Out R., Wiafe E.D., Kocke B.B.** Assessment of water quality in Ahor Lake – Ghana // *African Journ. of Environmental Science and Technology.* — 2011. — Vol. 5, N 12. — P. 1093–1099.
 24. **Митрукова Г.Г., Капустина Л.Л., Курашов Е.А.** Экологическая оценка качества вод литоральной зоны Ладожского озера по результатам микробиологических исследований // *Труды Карел. науч. центра РАН.* — 2020. — № 9. — С. 88–100.
 25. **Hachich E.M., Di Bari M., Christ A.P., Lamparelli C.C., Ramos S.S., Sato M.I.** Comparison of thermotolerant coliforms and *Escherichia coli* densities in freshwater bodies // *Braz. Journ. Microbiol.* — 2012. — Vol. 43, N 2. — P. 675–681.
 26. **Odonkor S.T., Ampofo J.K.** *Escherichia coli* as an indicator of bacteriological quality of water: an overview // *Microbiology Research.* — 2013. — Vol. 4, N 1. — P. 1–11.
 27. **Ge Z., Nevers M.B., Schwab D.J., Whitman R.L.** Coastal loading and transport of *Escherichia coli* at embayed beach in Lake Michigan // *Environ. Sci. Technol.* — 2010. — Vol. 44. — P. 6731–6737.
 28. **Haack S.K., Fogarty L.R., Wright C.** *Escherichia coli* and Enterococci at beaches in the Grand Traverse Bay, Lake Michigan: sources, characteristics, and environmental pathways // *Environ. Sci. Technol.* — 2003. — Vol. 37. — P. 3275–3282.

29. **Kinzelman J., Ng C., Jackson E., Gradus S., Bagley R.** Enterococci as indicators of Lake Michigan recreational water quality: comparison of two methodologies and their impacts on public health regulatory events // *Applied and Environmental Microbiology*. — 2003. — Vol. 69, N 1. — P. 92–96.
30. **Alm E.W., Burke J., Spain A.** Fecal indicator bacteria are abundant in wet sand at freshwater beaches // *Water Research*. — 2003. — Vol. 37 — P. 3978–3982.
31. **Nevers M.B., Byappanahalli M.N., Nakatsu C.H., Kinzelman J.L., Phanikumar M.S., Shively D.A., Spoljarich A.M.** Interaction of bacterial communities and indicators of water quality in shoreline sand, sediment, and water of Lake Michigan // *Water Research*. — 2020. — Vol. 178 — P. 1–11.
32. **Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N., Tomberg I.V., Malnik V.V., Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Shirokaya A.A., Synyukovich V.N., Zaitseva E.P., Domysheva V.M., Yamamuro M., Poberezhnaya A.E., Timoshkina E.M.** Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia) // *Journ. of Great Lakes Research*. — 2018. — Vol. 44. — P. 230–244.
33. **Palmer J.A., Law Ji-Y., Soupir M.L.** Spatial and temporal distribution of *E. coli* contamination on three inland lake and recreational beach systems in the upper Midwestern United States // *Sci. Total Environ.* — 2020. — Vol. 722. — P. 1–9.

Поступила в редакцию 16.04.2021

После доработки 06.10.2021

Принята к публикации 29.12.2021