

УДК 502.3:658.597.622.33

## КАЧЕСТВО ПРИБРЕЖНОЙ ВОДЫ В ОЗ. БАЙКАЛ В ПРЕДЕЛАХ БУХ. БОЛЬШИЕ КОТЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЕ ВЛИЯНИЕМ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ВЫЖИВАЕМОСТЬЮ ИНДИКАТОРНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ<sup>1</sup>

© 2024 г. В. В. Мальник<sup>а</sup>, А. С. Горшкова<sup>а, \*</sup>, И. В. Томберг<sup>а</sup>, О. Г. Нецветаева<sup>а</sup>,  
Е. В. Моложникова<sup>а</sup>, О. А. Тимошкин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, 664033 Россия

\*e-mail: kovadlo@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.06.2023 г.

После доработки 22.09.2023 г.

Принята к публикации 27.11.2023 г.

Проведено санитарно-бактериологическое и гидрохимическое обследование вод прибрежной зоны оз. Байкал, в том числе придонных и интерстициальных вод в районе пос. Большие Коты в июне и сентябре 2022 г. Для исследования использованы методы классической санитарной микробиологии с применением вакуумного фильтрования и селективных сред для проращивания санитарно-показательных микроорганизмов. Для определения концентраций химических компонентов использованы методы высокоэффективной жидкостной хроматографии и спектрофотометрии. Выяснено, что качество воды в зонах рекреации, а также в черте населенных мест, используемых для купания, в районе прибрежной зоны поселка соответствовало критериям нормативно-технической документации, принятой в России, по таким показателям, как *Escherichia coli* и энтерококки. Концентрации гидрохимических показателей, таких как фосфатный фосфор ( $P-PO_4^{3-}$ ), аммонийный ( $N-NH_4^+$ ), нитратный ( $N-NO_3^-$ ) и нитритный ( $N-NO_2^-$ ) азот, также были  $\leq$  ПДК для вод рыбохозяйственного назначения, установленных в РФ. Изучена выживаемость *E. coli* и энтерококков в условиях байкальской воды, а также в интерстициальной воде, что имеет достаточно важное значение для выбора индикаторов при оценке качества прибрежных вод. В ходе исследования определено, что *E. coli* и энтерококки дольше сохраняют физиологически активное состояние именно в условиях не прибрежной, а интерстициальной воды. Выяснено, что концентрации фекальных индикаторных бактерий в прибрежной зоне озера могут увеличиваться в зависимости от количества выпавших атмосферных осадков в связи со смывом микроорганизмов с берега. При изучении влияния биогенных элементов, содержащихся в атмосферных осадках, на прибрежную воду выяснено, что дожди не повлияли на количество биогенных элементов в исследуемой поверхностной и придонной воде.

**Ключевые слова:** Южный Байкал, фекальные индикаторные бактерии, *E. coli*, энтерококки, атмосферные осадки, выживаемость фекальных индикаторных бактерий, гидрохимические показатели.

DOI: 10.31857/S0321059624030082 EDN: AUNRFN

### ВВЕДЕНИЕ

Поселок Большие Коты (пос. Б. Коты) расположен на западном берегу Южного Байкала [34], численность населения на 1 июля 2022 г. составляла 51 человек, по оценке Федеральной службы государственной статистики [35]. В летнее время число жителей многократно увеличивается за счет дачников и туристов.

За последние пять-десять лет нагрузка на территорию пос. Б. Коты, которую активно застраивают частными домами и гостиницами, значительно возросла. Централизованная система очистки сточных вод в поселке отсутствует, а основная часть местного населения имеет обычные деревянные туалеты во дворе, в то время как гостиничные комплексы в основном оборудованы резервуарами для слива сточных вод без дна [10]. Однако в последние два года после ряда проверок природоохранной прокуратурой многие люди в поселке перешли на использование изолированных септиков.

За последние десять лет проводилось достаточно много работ по изучению содержания

<sup>1</sup> Исследования проведены в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (тема 0279-2021-0007 “Комплексные исследования прибрежной зоны озера Байкал: многолетняя динамика сообществ под воздействием различных экологических факторов и биоразнообразия; причины и последствия негативных экологических процессов”).

биогенных элементов в прибрежной зоне озера у пос. Б. Коты, что в первую очередь связано с экологическим кризисом в литоральной зоне озера [8, 39, 61]. Чаще всего этот относительно благополучный район сравнивают с расположенным южнее районом зал. Лиственничного и пос. Листвянка, где впервые были описаны негативные изменения (загрязнение биогенными элементами, массовое развитие чужеродных для открытого Байкала водорослей рода *Spirogyra* и др.) в прибрежной зоне озера [6, 17, 43]. По данным [44], уже в 2011 г. концентрации биогенных элементов в поверхностной воде у пос. Листвянка значительно превышали ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения. Исследования выявили поступление значительных концентраций азота и фосфора с водами притоков, впадающих в озеро в этом районе [10, 20, 51]. В пос. Б. Коты степень антропогенной нагрузки существенно ниже, поэтому на динамику концентраций биогенных элементов оказывают влияние в основном естественные факторы [18, 25, 55]. Несмотря на наличие локальных источников поступления биогенных элементов, превышения ПДК соединений азота и фосфора в прибрежной воде озера в этом районе не было зарегистрировано. Однако описаны случаи, когда даже незначительное повышение концентраций азота и фосфора в воде приводило к увеличению биомассы некоторых видов водорослей. Так, в 2019 г. повышение численности сине-зеленой водоросли *Dolichospermum lemmermanni* (Richter) в прибрежной воде была спровоцирована ливневыми дождями, в водах которых содержание нитратов достигало 3,6, аммония – 10, а фосфатов – 131 мкг/л, что было связано с пожарами на побережье озера [23]. Дождь и ливневые потоки, стекающие с берега, привели к многократному увеличению (нитратов – в 3 раза, аммония и фосфатов – на порядок) содержания биогенных элементов в прибрежной воде озера по сравнению с периодом, предшествующим осадкам.

Работ по изучению санитарно-показательных микроорганизмов в районе пос. Б. Коты немного. Необходимо отметить работу [2], в большой части касающуюся интерстициальных вод, изучаемых в пределах пляжей бух. Большие Коты. В работе [59] исследователи отмечают значи-

тельные превышения нормативов по санитарно-показательным микроорганизмам, которые обнаружены в июле 2022 г. в районе пос. Б. Коты. Концентрация *E. coli* была превышена в 9, энтерококков – в 35 раз [59]. В работе подобного плана [9] пробы воды отбирались по всему периметру озера в течение нескольких лет (с 2012 по 2016 г. и в 2020 г.). По статистическим расчетам динамики показателей качества воды по данным мониторинговых станций в поселках Листвянка и Большие Коты в большинстве случаев не выявили существенных различий численности фекальных индикаторных бактерий (ФИБ) в разные месяцы исследования [9]. На фоне экологического кризиса [17, 43, 61], который, как принято считать, начался с 2010–2011 гг. в масштабах прибрежной зоны всего озера, подобные работы необходимы для выяснения причин его возникновения.

Согласно основному регламентирующему документу, в водах поверхностных водных объектов в зонах рекреации, а также в черте населенных мест при купании количество *E. coli* и энтерококков в РФ не должно превышать соответственно 100 и 10 КОЕ (колониеобразующие единицы) в 100 мл [15].

Цель данного исследования – оценка качества прибрежных вод в поверхностных и придонных слоях, а также интерстициальной воды пляжей на содержание ФИБ у пос. Б. Коты в июне и сентябре 2022 г. с использованием санитарно-микробиологических и гидрохимических показателей качества вод, исследование выживаемости ФИБ в условиях байкальских и интерстициальных вод, а также изучение поступления ФИБ с берега в прибрежную воду озера при выпадении атмосферных осадков разной интенсивности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В июне и сентябре 2022 г. в пределах бух. Б. Коты определяли количество ФИБ и проводили гидрохимический анализ в прибрежных и интерстициальных водах пляжного грунта. Также проводилось экспериментальное изучение выживаемости ФИБ *in situ* как в прибрежной, так и интерстициальной воде прибрежного грунта.

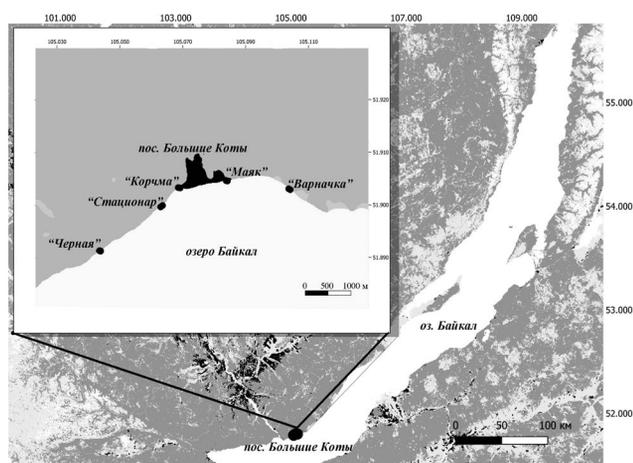
Пробы отбирались на пяти станциях (рис. 1) по следующей схеме:

- интерстициальная вода – вода из лунки, выкопанной на пляже в ~1 м выше уреза воды;
- приурезовая вода – озерная вода на расстоянии ~1 м от берега на глубине 10 см от поверхности;
- придонная вода – озерная вода на расстоянии 5–10 м от уреза воды в 30 см над дном при общей глубине 1 м.

На микробиологический анализ отбирали озерную воду у поверхности и дна в прибрежной зоне согласно нормативным документам [3]. Работы выполнялись с использованием стерильных шприцов Жане объемом 150 мл и таких же шприцов, закрепленных на длинном шесте (для отбора придонных байкальских вод) [7]. Затем пробы воды сливали в чистые пластиковые бутылки объемом 0.5 л. Микробиологические пробы интерстициальной и прибрежных вод отбирались в двух повторностях, время с момента отбора проб до проведения микробиологического анализа было ≤6 ч в соответствии с ГОСТ 31942-2012 [3]. Всего было отобрано 93 пробы: 72 пробы – для классического мониторингового исследования концентраций санитарно-по-

казательных микроорганизмов (60 проб в двух повторностях, 12 были исключительно погодными, т. е. отбирались для фиксации изменений качества воды после атмосферных осадков, если таковые были), 21 проба – на их выживаемость. Погодные пробы в июне отбирались во время дождя и на следующий день после дождя на ст. “Черная”, в сентябре – через день в течение всего времени экспедиции (14, 16, 18, 20, 22 и 24 сентября) на ст. “Стационар”.

Для эксперимента по выживаемости ФИБ в прибрежной зоне озера были подготовлены специальные сообщающиеся с внешней средой посредством фильтра в 0.2 мкм мезокосмы (прозрачные бутылки, пропускающие УФ-свет, из полиэтилентерефталата (ПЭТ) объемом 2 л, в завинчивающуюся крышку которых встроена фильтрующая насадка, через которую осуществляется обмен воздухом и водой с окружающей средой), а также закрытые прозрачные двухлитровые бутылки, пропускающие УФ-свет, с плотно закрытой завинчивающейся крышкой без встроенного фильтра; следовательно, это – система без обмена водой и воздухом с окружающей средой. Для погружения в лунки использовались прозрачные ПЭТ-бутылки объемом 0.25 л, пропускающие УФ-свет, в завинчивающуюся крышку которых также была встроена фильтрующая насадка, тогда как в закрытой системе такой насадки не было. В лунки помещались емкости, заполненные интерстициальной водой, тогда как в прибрежную зону открытого Байкала помещали емкости, заполненные прибрежной водой. В каждую из проб добавляли инокулят, взятый из сточного коллектора, расположенного на территории стационара ЛИН СО РАН. Исходные концентрации *E. coli* и энтерококков в обеих емкостях в прибрежной зоне составляли 22500 и 9500 КОЕ/100 мл соответственно. В мезокосме из лунки исходные концентрации *E. coli* и энтерококков составили 3710 и 1940 КОЕ/100 мл соответственно, а исходные концентрации в закрытом сосуде составляли 36000 и 15200 КОЕ/100 мл соответственно. Необходимо отметить, что исходные концентрации ФИБ оказывались в большей степени случайными, поскольку исходный материал (инокулят) брался из коллектора сточных вод, где концентрации ФИБ могут меняться



**Рис. 1.** Картограмма отбора проб воды в пределах бух. Большие Коты в июне и сентябре 2022 г. Черным обозначена область застройки, темно-серым – лес, светло-серым – голая земля, белым – водные объекты. Черные точки указывают на станции пробоотбора.

в зависимости от фазы роста микробов в разные дни, а объемы добавленного инокулята были разными для сосудов в 2 л и 0.25 л. В луночном мезокосме исходной при первой попытке остановки опыта концентрации хватило для фиксации динамики численности ФИБ, тогда как в зарытой в грунт закрытой бутылке и обеих емкостях с прибрежной водой исходной концентрации инокулята не хватило, и через несколько дней добавили больший объем стоков, в результате чего исходная численность ФИБ в зарытой в грунт закрытой бутылочке и емкостях с прибрежной водой значительно выросла. При постановке опыта мезокосм и закрытая емкость с прибрежной водой помещались в прибрежную зону озера на расстояние 7 м от уреза воды, тогда как мезокосм и закрытый сосуд с интерстициальной водой закапывались в грунт на расстоянии 1 м выше уреза.

Обнаружение и подсчет исследуемых групп бактерий проводили, используя метод мембранной фильтрации на нитроцеллюлозных фильтрах с диаметром пор 0.45 мкм в соответствии с МУК 4.2.1884-04 [14] и ГОСТ 24849-2014 [4]. Численность термотолерантных *E. coli* определялась методом мембранной фильтрации с использованием селективного Хай-хром агара (производство "Himedia" № M1571) [4]. Фекальных энтерококков выявляли методом мембранной фильтрации с использованием питательного селективного агара "Slanetz and Bartley Medium" (производство "Himedia" № M 612) и "Bile Esculine Azide Agar" (производство "Himedia" № M493) [4].

Для гидрохимического анализа воду отбирали в 1.5-литровые пластиковые бутылки (41 проба). Перед анализом биогенных элементов пробы фильтровали от взвешенного вещества через мембранные ацетатцеллюлозные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Валовое содержание азота и фосфора определяли в нефилтрованных пробах. Для измерения величины рН использовали рН-метр с комбинированным электродом и термокомпенсатором "Эксперт-001" (Россия), погрешность измерения 0.02 ед. рН. Удельную электропроводность воды измеряли кондуктометром "Эксперт-002" (Россия), оснащенным встроенным датчиком термокомпенсации, где электропроводность на

выходе приведена к 25°C.

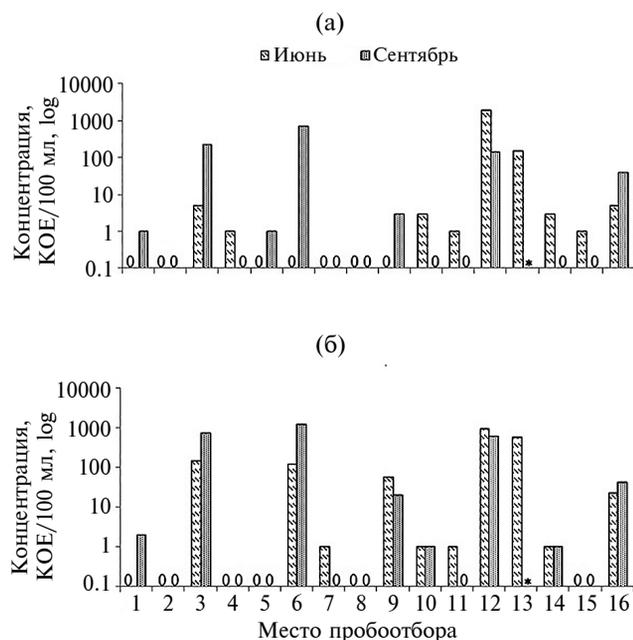
Химический анализ выполняли общепринятыми в гидрохимии пресных вод методами [1, 13, 19]. Концентрацию растворенного кислорода в воде определяли методом Винклера. Концентрации биогенных элементов измеряли на спектрофотометре "UNICO-2100" (США): нитриты – с реактивом Грисса, нитраты – с салициловокислым натрием, аммонийный азот – индофенольным методом, фосфаты – методом Дениже-Аткинса с хлористым оловом в качестве восстановителя. Для определения кремнекислоты использовали метод, основанный на измерении интенсивности окраски желтой кремнемолибденовой гетерополикислоты. Содержания общего фосфора и азота определяли после персульфатного окисления при нагревании. Концентрации ионов кальция и магния измеряли методом атомно-абсорбционной спектроскопии, натрия и калия – методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Содержание гидрокарбонатов, хлоридов и сульфатов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на Милихроме А-02 (Россия). Для определения легкогидролизуемого органического вещества использовали метод перманганатной окисляемости (ПО).

Пробы атмосферных осадков (АО) в пос. Б. Коты в сентябре собирали в пластиковую емкость (таз) диаметром 39 см. Количество осадков определяли как соотношение объема собранной пробы (см<sup>3</sup>) и площади (см<sup>2</sup>) дна емкости, в которую падают осадки с пересчетом в миллиметры [60]. О количестве осадков, выпавших в июне в пос. Б. Коты, судили по данным, полученным на российской станции мониторинга атмосферы сети ЕАНЕТ, расположенной в пос. Листвянка. Дожди отбирались автоматическим wet-only саплером "US-330" (Япония) с диаметром воронки 30 см. Их количество рассчитывалось так же, как в пос. Б. Коты, в соответствии с [60]. Биогенные элементы в АО определяли после фильтрования (мембранные ацетатцеллюлозные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм): аммонийный азот спектрофотометрически с реактивом Несслера, нитраты – методом ВЭЖХ [1, 13]. Методы для определения фосфатов и нитритов совпадают с методами определения в озерной воде.

Статистический анализ выполняли с использованием программного обеспечения PSPP [36]). Количественные данные по ФИБ были протестированы с помощью теста Шапиро–Уилкса для проверки распределения по нормальному закону. Взаимосвязь между показателями качества воды в прибрежной зоне по санитарно-бактериологическим и гидрохимическим показателям оценивали с помощью корреляционного анализа. Установлен уровень значимости  $p = 0.05$ . Интерпретацию коэффициента корреляции проводили по [38]. Разницу рН и концентраций кислорода между интерстициальными и прибрежными водами рассчитывали  $t$ -критерием Стьюдента.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Санитарно-бактериологическая обстановка в районе бух. Большие Коты



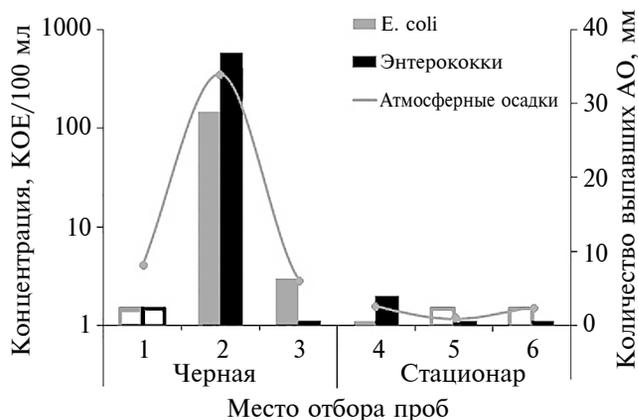
**Рис. 2.** Концентрации *E. coli* (а) и энтерококков (б) в приуезовой, придонной и интерстициальной воде в районе пос. Б. Коты в 2022 г. 1 – Стационар, 1 м от уреза; 2 – Стационар, у дна; 3 – Стационар, лунка; 4 – Корчма, 1 м от уреза; 5 – Корчма, у дна; 6 – Корчма, лунка; 7 – Варначка, 1 м от уреза; 8 – Варначка, у дна; 9 – Варначка, лунка; 10 – Маяк, 1 м от уреза; 11 – Маяк, у дна; 12 – Маяк, лунка; 13 – Черная, 1 м от уреза; 14 – Черная, после ливня; 15 – Черная, у дна; 16 – Черная, лунка. Звездочки на местах столбцов в диаграмме свидетельствуют об отсутствии данных. Нули на местах столбцов в диаграмме свидетельствуют о том, что при анализе проб ФИБ не были обнаружены.

На пяти трансектах определялись концентрации санитарно-показательных микроорганизмов. Концентрации ФИБ в приуезовой и придонной воде были близкими к нулю, тогда как их концентрации в лунках иногда были высокими (рис. 2).

В июне отметили значительную концентрацию *E. coli* в интерстициальной воде в районе гостиницы “Маяк” (1885 КОЕ/100 мл), тогда как в сентябре значительная концентрация была зафиксирована в районе точки пробоотбора “Корчма” (700 КОЕ/100 мл) (рис. 2а). В июне на одной из трансект (у гостиницы “Маяк”) была зафиксирована концентрация энтерококков 985 КОЕ/100 мл (рис. 2б). Максимальные концентрации энтерококков в лунках (от 618 до 1215 КОЕ/100 мл) наблюдали в сентябре на трех трансектах из пяти (рис. 2б). Анализ, проведенный в урезовой и придонной воде прибрежной зоны оз. Байкал, показал, что концентрация ФИБ на всех пяти трансектах была  $\leq 5$  КОЕ/100 мл (рис. 2). Это свидетельствовало о хорошем качестве поверхностной и придонной воды в зоне рекреации, а также в черте населенных мест, используемых для купания, у пос. Б. Коты.

### Влияние количества АО на численность ФИБ

В июне проведена рекогносцировка распределения ФИБ в приуезовой зоне (в 300 м севернее



**Рис. 3.** Влияние атмосферных осадков на концентрации ФИБ в приуезовой зоне на ст. “Черная” (1–3) и ст. “Стационар” (4–6). 1 – 6–9 июня 2022 г.; 2 – 11 июня 2022 г.; 3 – 12 июня 2022 г.; 4 – 14 сентября 2022 г.; 5 – 22 сентября 2022 г.; 6 – 24 сентября 2022 г. Пустые столбцы свидетельствуют о нулевых показателях ФИБ.

пади Черной) в условиях сильного ливня и на следующий день после него (рис. 3). Грязные ручьи стекали со склона, у подножия которого были отобраны пробы прибрежной воды. Выяснено, что во время этого события (11 июня) концентрации *E. coli* и энтерококков в приуезовой воде составили 148 и 580 КОЕ/100 мл соответственно, что нетипично много для данной точки, в которой ранее отмечались незначительные показате-

ли численности ФИБ, о чем указывалось в [2], где средние величины по термотолерантным колиформным бактериям (в которые входит *E. coli*) и энтерококкам с 2011 по 2013 г. составляли 2 и 6 КОЕ/100 мл соответственно. На следующий день (12 июня) концентрации *E. coli* и энтерококков в приуезовой воде составили в среднем 3 и 1 КОЕ/100 мл (рис. 2, 3). Измеренное количество выпавших осадков с 10 на 11 июня составило 34

**Таблица 1.** Основные даты пробоотбора по стандартным точкам с некоторыми гидрофизическими и гидрохимическими параметрами воды (прочерк – отсутствие данных)

Место отбора		Дата	рН	<i>T</i> воды	Электропроводность	<i>O</i> <sub>2</sub> ,		Si
				°С		мкСм/см	мг/л	
Стационар	Лунка	08.06.2022	7.68	8.3	119	10.6	95	1.91
		14.09.2022	7.17	10.7	242.1	4.04	53	4.85
		16.09.2022	7.46	8.9	126.9	0.05	1	1.65
	Урез	08.06.2022	8.33	7.5	121.8	12.71	112	0.51
		14.09.2022	7.73	6.9	124.1	7.91	94	0.5
		16.09.2022	8.68	7.1	124.5	9.2	110	0.39
	У дна	08.06.2022	8.1	5.3	122.8	12.09	101	0.63
		14.09.2022	7.66	6.6	122.5	8.82	104	0.44
		16.09.2022	8.53	6.8	123.6	9.59	113	0.28
Корчма	Лунка	08.06.2022	7.75	9.7	123.2	9.67	84	0.78
		15.09.2022	7.54	9.1	148.6	4.17	52	0.99
	Урез	08.06.2022	8.57	7	121.3	12.49	109	0.57
		15.09.2022	8.26	8.9	122.7	8.58	107	0.43
	У дна	08.06.2022	8.24	6.3	121.6	13.13	112	0.6
		15.09.2022	8.08	9	122.5	8.89	111	0.76
Варначка	Лунка	09.06.2022	7.88	8.5	130.1	9.31	84	0.74
		17.09.2022	8.02	7.9	133.9	7.12	87	0.45
	Урез	09.06.2022	7.95	5.9	123.6	11.84	100	0.63
		17.09.2022	8.13	7.2	122.3	8.94	107	3.91
	У дна	09.06.2022	7.93	5.4	122.9	11.7	98	0.65
		17.09.2022	7.88	7.9	121.8	9.66	118	0.36
Черная	Лунка	12.06.2022	7.76	11.3	140.9	8.52	82	1.08
		15.09.2022	8.39	8.9	132.4	6.07	76	0.63
		11.06.2022	7.99	6.6	121	-	-	0.8
	Урез	11.06.2022	7.97	6.6	121.7	-	-	0.66
		12.06.2022	8.01	10.7	122.8	11.62	111	0.6
		15.09.2022	8.43	8.6	121.8	9.24	114	0.44
	У дна	12.06.2022	7.93	6.7	122.4	12.2	105	0.61
		15.09.2022	8.39	7.6	123	9.33	113	0.41
		16.09.2022	8.15	7.3	123.6	9.37	112	1.12
Маяк	Лунка	12.06.2022	7.71	10.1	127.3	10.38	97	0.9
		16.09.2022	7.86	9.8	175.2	7.01	89	0.4
	Урез	12.06.2022	9.52	8.2	120.3	15.23	137	0.32
		16.09.2022	8.11	7	123.8	9.01	107	0.49
	У дна	12.06.2022	8.08	7.8	124	13.35	118	0.51
		16.09.2022	8.15	7.3	123.6	9.37	112	1.12

**Таблица 2.** Концентрации биогенных компонентов в дождевой воде (мг/л) и количество атмосферных осадков (АО) в мм

Пункт отбора проб АО	Дата выпадения АО	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Количество осадков
		мг/л				
пос. Листвянка	6.06.2022–9.06.2022	0.003	0.32	0.35	<0.001	8.1
	10.06.2022–11.06.2022	0.001	<0.01	0.08	<0.001	34
	11.06.2022–13.06.2022	0.002	0.05	0.11	<0.001	6.4
пос. Б. Коты	13.09.2022–14.09.2022	0.014	0.72	0.34	0.001	2.7
	20.09.2022–21.09.2022	0.009	0.93	0.14	0.001	0.9
	24.09.2022	0.032	0.63	0.22	<0.001	2.5
	25.09.2022	0.075	2.08	0.06	0.001	1.8

мм, в последующие два дня (12–13 июня) – 6.4 мм, в предыдущие четыре дня перед ливнем (с 6 по 9 июня) – 8.1 мм. Количество осадков в июне основано на данных по близлежащему пос. Листвянка. В сентябре такого количества выпавших осадков не отмечалось, тем не менее в ходе осеннего отбора проб для определения влияния АО на численность ФИБ вода отбиралась с периодичностью через день (табл. 1, 2). В табл. 2 приведены данные о количестве выпавших АО. Параллельно в точке “Стационар” определялись концентрации ФИБ в приуездовой зоне озера. После дождя 14 сентября в воде были обнаружены 1 КОЕ/100 мл *E. coli* и 2 КОЕ/100 мл энтерококков. В пробах, отобранных 22 сентября (20–21 сентября небольшой дождь), концентрации *E. coli* и энтерококков составляли 0 и 1 КОЕ/100 мл соответственно. Такие же значения наблюдали и на следующий день после осадков, выпавших 24 сентября.

По графику на рис. 3 видно, что малые количества выпавших осадков в сентябре практически не влияли на численность ФИБ, тогда как ливень в июне способствовал увеличению численности санитарно-показательных бактерий в прибрежной воде озера (рис. 3).

**Таблица 3.** Средняя температура (утро, день, вечер), °С, воздуха (1), прибрежной (2) и интерстициальной (3) воды в условиях мезокосмов с 19.09.2022 по 26.09.2022 на ст. “Стационар” (прочерк – отсутствие данных)

Дата измерения	1	2	3
19.09.2022	8.9	–	8.8
20.09.2022	10.4	9.9	9.4
21.09.2022	9.1	-	9.8
22.09.2022	7.0	9.9	8.1
23.09.2022	11.5	-	10.9
24.09.2022	8.7	9.7	9.9
25.09.2022	7.1	-	9.2

### *Выживаемость санитарно-показательных микроорганизмов*

Данные получены для прибрежной зоны открытого Байкала и интерстициальной воды заплесковой зоны. Средняя температура приуездовой и интерстициальной воды, а также воздуха в течение суток (утром, днем и вечером) измерялись при проведении экспериментов в мезокосмах (табл. 3).

**Мезокосм, погруженный в прибрежной воде оз. Байкал.** Продолжительность эксперимента 8 сут. Анализ результатов показал, что на 3-и сут численность ФИБ мало изменилась, тогда как на 5-е сут численность *E. coli* и энтерококков снизилась в 8 и 4 раза соответственно. На 7-е и 8-е сут энтерококки уже практически не регистрировались, а *E. coli* были обнаружены в количестве 30 и 9 КОЕ/100 мл соответственно (рис. 4а). На 7-е сут доли выживших энтерококков и *E. coli* составили 0.01 и 0.13% соответственно.

**Закрытая бутылка, погруженная в прибрежную воду оз. Байкал.** Продолжительность эксперимента 8 сут. В условиях закрытой бутылки, несмотря на то, что численность *E. coli* падала стремительней, чем энтерококков, на 7-е и 8-е сут энтерококки вообще не были обнаружены, тогда как небольшое количество КОЕ кишечной палочки на 7-е и 8-е сут все еще регистрировалось (рис. 4б). На 7-е сут доли выживших энтерококков и *E. coli* составили 0 и 0.11% соответственно.

**Мезокосм, установленный в толще пляжного грунта.** Продолжительность эксперимента 12 сут. Из графика (рис. 5а) видно, что численность *E. coli* с 1-х до 9-х сут наблюдений стре-

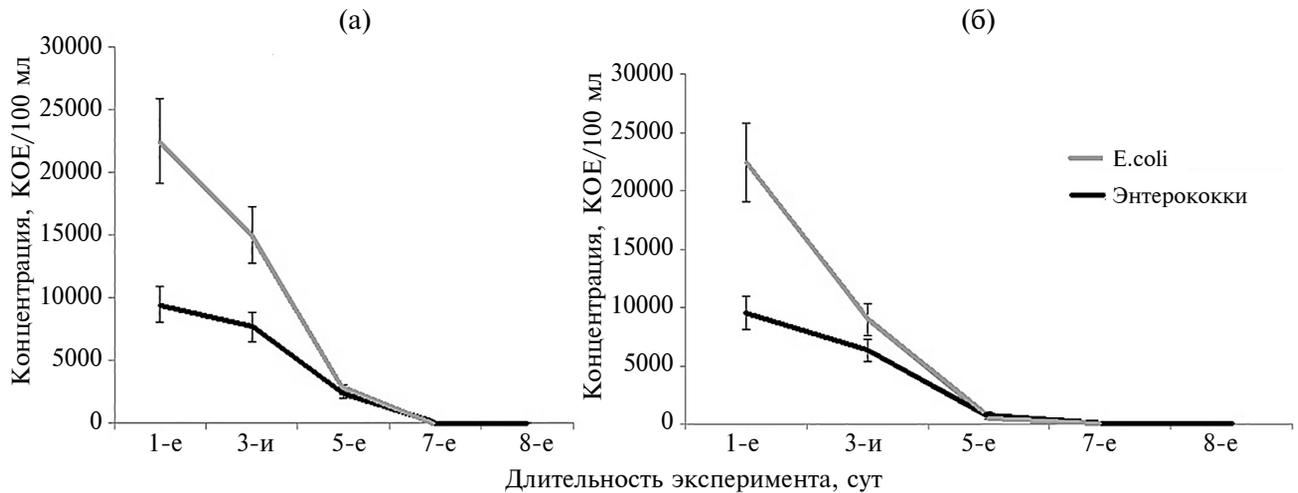


Рис. 4. Зависимость численности ФИБ от времени экспозиции в мезокосме (а) и закрытой бутылки (б), помещенных в приуезовую зону вблизи стационара ЛИН СО РАН, в пос. Б. Коты.

мительно падает с 3710 до 20 клеток в 100 мл (культивируемых клеток осталось <1%). Концентрация энтерококков остается почти постоянной и к 12-м сут эксперимента падает в 4.7 раза (до 415 КОЕ/100 мл) в сравнении с исходной (1940 КОЕ/100 мл) (рис. 5а). На 7-е сут доли выживших энтерококков и *E. coli* составили 53 и 39% соответственно.

**Закрытая бутылка, погруженная в толщу прибрежного грунта.** Продолжительность эксперимента 8 сут. В эксперименте было отмечено стремительное падение численности *E. coli* уже к 3-м суткам – в ~7 раз, тогда как численность энтерококков к концу 3-х сут почти не изменилась (рис. 5б). На 5-е, 7-е сут концентрация эн-

терококков стабильно выше концентрации кишечной палочки (в ~2 раза), несмотря на то, что изначально на 1-е сут, наоборот, концентрация *E. coli* была в 2.4 раза выше, чем энтерококков. На 8-е сут пребывания в закрытой емкости численность культивируемых ФИБ критически понизилась до единиц КОЕ/100 мл (рис. 5б). На 7-е сут доли выживших энтерококков и *E. coli* составили 20 и 4% соответственно.

Если рассматривать отдельно количества энтерококков в мезокосмах с интерстициальной и прибрежной водой, то видно, что на 7-е сут доли культивируемых энтерококков составляли 53 и 0.01% соответственно. Также, если отдельно рассмотреть, концентрации *E. coli* в мезокосме с

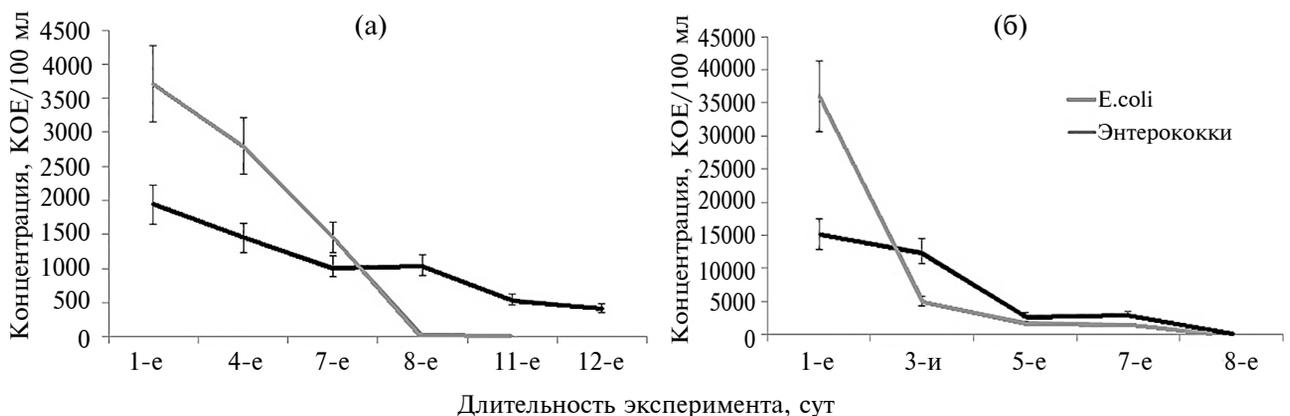


Рис. 5. Зависимость численности ФИБ от времени экспозиции в мезокосме (а) и закрытой бутылки (б), помещенных в лунке под слоем грунта вблизи стационара ЛИН СО РАН, в пос. Б. Коты.

интерстициальной и прибрежной водой, то видно, что на 7-е сут доли культивируемых клеток кишечной палочки составляли 39 и 0.13% соответственно.

**Конценации химических компонентов** в воде разных станций изменялись в широких пределах и имели как сезонные особенности, так и разные источники поступления. Для интерстициальной воды лунок были характерны низкие величины рН и пониженное содержание кислорода по сравнению с водой озера (критерий Стьюдента,  $p < 0.05$ ) (табл. 1). Так, в сентябре у ст. “Стационар” величина рН в воде лунки составляла 7.17–7.76, а содержание растворенного  $O_2$  варьировало от 0 до 5.5 мг/л. В период исследований концентрации минерального азота в воде лунок варьировали от 0.11 до 0.33 мг/л в июне и от 0.04 до 0.42 мг/л в сентябре. В июне максимальные концентрации этого компонента наблюдали в лунке на пляже у ст. “Черная”, а в сентябре – в лунке у ст. “Стационар”. Среди минеральных форм в интерстициальной воде преобладал нитратный азот (86–97%), содержание аммонийного было не велико (2–14%), нитритный азот наблюдали только в сентябре в концентрациях  $\leq 0.002$  мг/л ( $< 1\%$  суммы минерального азота). Содержание минерального

фосфора в воде лунок выше в июне (0.013–0.043 мг/л), чем в сентябре (0.006–0.025 мг/л), максимальные значения в обоих случаях регистрировали в районе ст. “Стационар”. Суммарное содержание ионов солей в воде лунок варьировало от 94 до 177 мг/л: содержание гидрокарбонатов составляло 62.6–97.0, хлоридов – 0.42–3.0, сульфатов – 6.2–37, кальция 14.8–32.8, магния – 2.9–7.6, натрия – 3.3–4.5 и калия – 1.0–1.8 мг/л. В июне максимальные концентрации ионов регистрировали в воде лунки на ст. “Черная” на следующий день после сильного дождя, а в сентябре – в лунке у “Стационара”.

Содержание кремния в интерстициальной воде варьировало в широких пределах – от 0.40 до 4.85 мг/л. Высокие концентрации кремния в июне и в сентябре регистрировали на пляже ст. “Стационар”, где отмечается поступление в заплесковую зону более богатых кремнием подземных вод, собирающихся в межгорной долине. Близкие концентрации ионов и кремния наблюдаются в воде ручья, протекающего по дну этой долины и впадающего в Байкал в 100 м севернее ст. “Стационар” [18]. Величина ПО в воде лунок в июне была  $\leq 1.3$  мг О/л, в сентябре выше – 1.4–6.2 мг О/л.

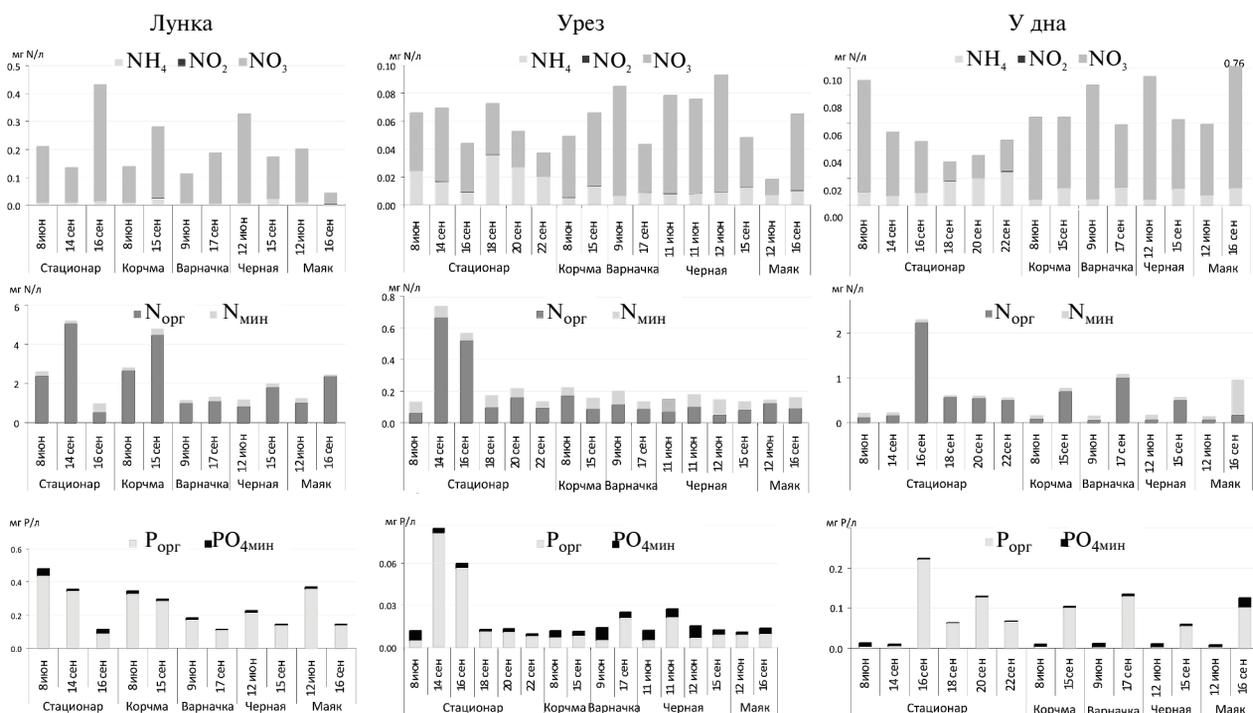


Рис. 6. Содержание биогенных элементов в воде в июне и сентябре 2022 г. у пос. Б. Коты.

В приуезовой воде озера концентрация  $O_2$  и величина рН выше, а содержание биогенных элементов ниже, чем в интерстициальной воде (табл. 1, рис. 6). Высокое насыщение озерной воды  $O_2$  (до 100–137% нас) в июне связано с фотосинтетической активностью развивающихся на уресе бентосных водорослей, о чем также свидетельствуют высокие значения рН. Так, у гостиницы “Маяк” при концентрации растворенного  $O_2$  15.23 мг/л величина рН приуезовой воды достигала 9.52. В сентябре содержание  $O_2$  менялось в пределах 10.83–12.64 мг/л с насыщением 94–112%. Концентрации фосфора фосфатов менялись от 0.002 до 0.009 мг/л, что составляло от 10 до 60% общего содержания фосфора в прибрежной воде. В июне концентрации минерального фосфора были выше, чем в сентябре, и это согласуется с сезонной динамикой этого компонента в воде озера [26]. В прибрежной воде, как и в интерстициальной, преобладал нитратный азот в концентрациях от 0.01 до 0.08 мг/л (62–92% общего содержания  $N_{\text{мин}}$ ). Исключение составляет вода, отобранная на “Стационаре” 18–22 сентября, когда доля аммонийного азота увеличилась до 49–54% общего содержания  $N_{\text{мин}}$ . Возможно, это связано с высокими концентрациями (до 2.08 мг/л) этого компонента в дождевой воде и смыве с берега. Нитритный азот фиксировали только в июне во время сильного дождя на ст. “Черная” в следовых количествах (0.001 мг/л). Концентрации кремния в прибрежной воде были не высокими и менялись в пределах 0.32–0.80 мг/л (табл. 1).

В придонной области концентрации минеральных форм азота и фосфора и их общее содержание в основном выше, чем в приуезовой воде (рис. 6). В сентябре у отеля “Маяк” содержание нитратного азота в придонной воде увеличилось до 0.76, минерального фосфора – до 0.024, а кремния – до 1.12 мг/л, что соответственно в 15, 6 и 2.3 раза выше концентраций этих компонентов в приуезовой воде в этом районе (табл. 1, рис. 6). На остальных трансектах в придонной воде, как и на уресе, концентрации минеральных азота и фосфора в июне выше, чем в сентябре. В начале лета фосфаты составляли 64–72% общего содержания фосфора, минеральный азот – 40–57% общего содержания азота. К сентябрю потребление минеральных форм биогенных элементов

фитопланктоном и фитобентосом привело к снижению их концентраций (1–24% общего содержания) и увеличению содержания органических соединений этих компонентов в придонной воде. Концентрации ионов солей в приуезовой и придонной воде близки на всех станциях и в основном не отличаются от таковых в воде открытого Байкала [5]. В период исследования среднее содержание гидрокарбонатов в прибрежной воде бух. Большие Коты составляло  $67.2 \pm 2.3$  мг/л, хлоридов –  $0.56 \pm 0.19$ , сульфатов –  $6.2 \pm 0.6$ , кальция –  $16.40 \pm 0.37$ , магния –  $3.04 \pm 0.27$ , натрия  $3.46 \pm 0.16$ , калия –  $0.96 \pm 0.04$  мг/л ( $\pm$  стандартное отклонение). Величина ПО в прибрежной воде в июне была  $\leq 1.0$  мг О/л, в сентябре была выше – до 3.4 мг О/л, что связано с продукционными процессами фитобентоса и фитопланктона.

Анализ содержания биогенных элементов в АО показал, что концентрации нитритного азота в дождях сопоставимы с таковыми в поверхностной прибрежной байкальской воде ( $< 0.001$  мг/л). Содержание нитратного азота также близко к величинам в урезовой байкальской воде в оба месяца (0.08–0.35 мг/л). Важно отметить, что концентрации аммонийного азота в сентябре (0.63–2.08 мг/л) в дождевой воде были гораздо выше, чем в июне ( $\leq 0.32$  мг/л). Концентрации фосфатов также выше в сентябре (в среднем в 16 раз), чем в июне (табл. 2).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Более раннее исследование по определению концентраций ФИБ в прибрежной (в том числе придонной) и интерстициальной (на расстоянии 0.5 м выше уреса) воде было проведено в районе пос. Листвянка в июле 2016 г. на трех трансектах на расстоянии 3, 10, 20 и 50 м от берега [16]. На всех трех трансектах, расположенных в пределах пос. Листвянка, в интерстициальных водах отмечались концентрации *E. coli* и энтерококков  $> 1000$  КОЕ/100 мл. На одной из трансект все четыре точки содержали ФИБ в концентрациях, превышающих ПДК по СанПиН [15]. Более высокие показатели численности ФИБ в интерстициальных и придонных водах могут быть связаны с сезонностью отбора проб (в июле), а также с большей антропогенной нагрузкой на мелководную зону литорали в районе пос. Листвянка.

В другом исследовании с 2017 по 2021 г. изучали концентрации **ФИБ** в районе пос. Листвянка на восьми станциях прибрежной зоны озера в 215 пробах, отобранных за этот период [11]. Авторы указывают, что качество воды в прибрежной зоне оз. Байкал в последние годы также явно снижается. Исследователи делают вывод, что пространственное распределение санитарно-значимых бактерий в прибрежной зоне пос. Листвянка неоднородно. Более высокую их численность отмечали на станциях, где в оз. Байкал попадают неочищенные сточные воды. Авторами показано, что численность **ФИБ** в водах зал. Лиственничного не связана с уровнем и температурой воды, а меняется в зависимости от сезона и степени антропогенной нагрузки.

Предположительно, антропогенное влияние на прибрежную зону у пос. Б. Коты было в разы меньшим, чем на прибрежную зону пос. Листвянка, и текущая работа прояснила это предположение после определения качества прибрежных вод по гидрохимическим и санитарно-микробиологическим показателям.

Согласно данным [59], обнаружено значительное превышение нормативов по **ФИБ** в бух. Большие Коты в июле 2022 г. Это может быть связано с увеличением антропогенной нагрузки в этот период, высокой температурой прибрежной воды, количеством выпавших **АО**, одновременным с отбором проб влиянием корабля, на базе которого проводились исследования, и т. д. Работы, выполненные в районе пос. Большие Коты в июне и сентябре этого же года на пяти изучаемых трансектах, не регистрировали подобного увеличения численности **ФИБ** в пределах всей бух. Большие Коты.

Концентрация микроорганизмов в поверхностной воде может возрасти после сильных дождей из-за повышенного объема стоков и ресуспензии микробов из донных осадков [30, 33]. Согласно [45], наоборот, повышенный уровень **АО** может уменьшить концентрации патогенов в поверхностной воде благодаря разбавлению. Повышенная температура воды может вызывать отмирание патогенных бактерий и, таким образом, уменьшать их концентрации [22, 63, 65]. Однако в нескольких исследованиях упоминалось о

положительной корреляции между температурой воды и бактериальными концентрациями в связи с совместным воздействием летней температуры, периодов интенсивных **АО** и большого стока [41, 57]. Однако, как именно каждый из этих параметров (температура и количество **АО**) влиял на изменения концентраций патогенных бактерий, не выяснено [63].

Поскольку в настоящем исследовании при июньском отборе проб во время ливня в приустьевой воде у т. Черной (рис. 3) были обнаружены превышения по концентрациям **ФИБ**, то предположили, что это может быть связано со смывом экскрементов (человека, диких и домашних животных, птиц) поверхностным склоновым стоком, что согласуется с данными [47]. Эти данные свидетельствовали о повышенных концентрациях **ФИБ** во время дождей, причем **АО** и температура воды положительно коррелировали с их концентрациями [47].

В сентябре при отборе проб, когда суточный объем осадков был  $\leq 2.7$  мм, увеличение численности **ФИБ** в приустьевой и придонной воде не было зафиксировано (рис. 2а, 2б, 3). В другой работе, проведенной на побережье Адриатического моря в Хорватии, отмечено, что воздействие дождей на концентрации **ФИБ** не обнаружено в том районе, вероятно, благодаря низкому количеству выпавших **АО** [52]. Таким образом, можно предположить, что осадки на исследованной территории в Хорватии не оказывали влияния на концентрации **ФИБ** в прибрежной воде или что дожди были недостаточными для большего поступления **ФИБ**, поскольку небольшое количество **АО**, которое приносило **ФИБ**, вероятно, быстро поглощалось карстовым грунтом до достижения поверхностных вод моря [64], что согласовывалось с данными настоящего исследования. В [56] выявлено отсутствие корреляции между осадками ниже среднего уровня и **ФИБ**, указано, что **АО** не хватило времени, чтобы достигнуть пляжа в виду того, что отбор проб выполнялся в течение  $< 24$  ч после дождя. На основе этого исследования и других данных каждый пляж должен рассматриваться как отдельный объект с персональными характеристиками, которые могут оказывать влияние на микробные концентрации [56]. Кроме того, в [53] обнару-

жен совсем небольшой эффект дождя в 16 мм на микробиологическое качество воды, при том что выявлена более высокая насыщенность фекальными колиформными бактериями при малом количестве осадков. В [53] эта особенность могла объясняться высокими приливами.

Однако многие исследования показали значительное влияние количества АО на величины ФИБ в поверхностных водах исследованных водоемов. Авторы предполагают, что дождь действительно не всегда приводит к повышенным концентрациям индикаторных бактерий, и многие факторы имеют влияние на возможную взаимосвязь, такие как количество выпавших осадков, время, которое проходит от момента дождя до отбора проб, приливы и направление ветра [21, 40, 68]. Интенсивные дожди после периода длительной засухи, вероятно, увеличат поступление ФИБ в прибрежные области [26], и это, в свою очередь, также будет справедливым для поверхностных вод вдоль побережья Байкала.

Ранее было проведено исследование в Южной котловине Байкала на наличие ФИБ и биогенных элементов не только в поверхностной приустьевой воде, но также в придонной и интерстициальной воде в 1 м выше уреза в г. Слюдянке, пос. Листвянка, пос. Большое Голоустное [48]. Выявлено, что интерстициальные воды пляжей у населенных пунктов содержали ФИБ в значительных концентрациях. Это может свидетельствовать о том, что именно в этих условиях (под слоем грунта) ФИБ могут сохраняться дольше [48]. Продемонстрирована возможность проникновения отходов человеческой жизнедеятельности через интерстициальную воду [48].

По итогам настоящего исследования выяснилось, что в зависимости от типа эксперимента время, необходимое для уменьшения начальной численности *E. coli* на 50%, менялось от двух до семи дней в случае интерстициальных проб с инокулятом (рис. 5) и от двух до четырех дней в случае проб прибрежной воды с инокулятом (рис. 4), что вполне согласуется с данными [67], где обнаружено, что время, необходимое для снижения исходной численности *E. coli* на 50%, длилось <2 сут при наполнении мезокосмов природной водой.

В настоящем исследовании показано, что на 12-е сут культивирования концентрация энтерококков составила 415 КОЕ/100 мл, что составило >21% исходной концентрации клеток (1940 КОЕ/100 мл) (рис. 5а) в случае мезокосма, сообщающегося с окружающей средой и расположенного в лунке, выкопанной в приустьевой зоне. Одновременно видно, что в мезокосмах, расположенных в прибрежной воде и подвергающихся регулярному влиянию дневного света, численность энтерококков была близка к нулю уже на 7-е сут (рис. 4а, 4б). Другие исследователи [45] провели довольно интересную работу в мезокосмах по энтерококкам в лабораторных стрессовых условиях, схожих с условиями в оз. Гарда (Италия). При температуре 4°C в мезокосме с непрерывным освещением никаких культивируемых клеток не наблюдалось после 20 сут инкубации для *E. faecalis* и после 45 сут в случае с *E. faecium*. Более заметная задержка, а именно 40 сут, наблюдалась, когда в мезокосме со стерилизованной озерной водой, содержащей *E. faecalis*, клетки поддерживались при 4°C в месте, которое не было непрерывно освещено, что свидетельствовало о том, что именно непрерывное освещение оказывало губительное действие на клетки энтерококков. При этом последнем условии на 70-е сут от времени инокуляции мезокосма 10<sup>3</sup>/мл клеток *E. faecium* все еще оставались культивируемыми [45]. Таким образом, время сохранения культивируемого состояния микроорганизмов может увеличиваться в отсутствие постоянного освещения, что согласуется с итогами настоящего исследования (рис. 4а, 4б, 5а). Такая большая разница времени сохранения культивируемого состояния клеток ФИБ в настоящем и упомянутом выше исследовании может быть связана с тем, что в опытах [45] использовалась стерильная проавтоклавированная вода без комплекса автохтонной микрофлоры (простейших, зоопланктона, бактерий), тогда как в данном исследовании использовалась неавтоклавированная природная вода со всем комплексом микроорганизмов, которые потенциально могут уменьшить численность энтерококков и *E. coli*, что подтверждено предыдущим исследованием [66].

Обнаружено, что в условиях Байкала при обмене емкости с окружающей средой газами и

водой (мезокосм), по результатам проведенных экспериментов, кишечная палочка выживала дольше в сравнении с кишечными энтерококками (рис. 4). Поскольку известно, что солнечный свет – самый важный фактор окружающей среды, влияющий на сокращение численности аллохтонных бактерий в морской воде и что *E. coli* обычно менее устойчивы, чем кишечные энтерококки [24, 29, 37, 58], то важно отметить, что кишечная палочка в условиях байкальской воды оказалась даже лучшим индикатором качества воды при естественной солнечной радиации. Такая устойчивость *E. coli* в сравнении с морской водой может быть связана с низкими температурой и минерализацией воды.

В проведенном исследовании средняя температура прибрежной и интерстициальной воды была 8.2 и 9.4°C соответственно (табл. 1, 3). В [32] проводили исследование выживаемости *E. coli* и энтерококков в мезокосмах в песке и морской воде при температуре 20, 30 и 40°C [32]. В настоящем исследовании, также в эксперименте с мезокосмом без освещения, наполненным интерстициальной водой, длительность выживания энтерококков была значительно большей, чем в мезокосме, размещенном в открытой воде, при естественном освещении. В мезокосме в условиях естественного солнечного света культивируемые клетки ФИБ достаточно быстро исчезали (рис. 4а, 5а). Исследователи, проводившие работу на побережье Флориды, выяснили, что высокие концентрации индикаторных бактерий сохранялись в природном песке в течение эксперимента в противоположность отмиранию, отмеченному в морской воде; таким образом, наблюдались схожие результаты и в условиях байкальских мезокосмов [32].

В данном исследовании использовались мезокосмы и закрытые емкости с добавлением природной воды из Байкала и интерстициальной воды прибрежной зоны Байкала, которые насыщены комплексом бактерий-конкурентов, зоопланктона и простейших, оказывающих влияние на аллохтонные микроорганизмы (*E. coli*, энтерококков). Не проводилось изучение негативных воздействий естественной микробиоты на выживание ФИБ в воде, тогда как в работах [42, 49] продемонстрировано это влияние. В [66]

выяснено, что дезинфекционная обработка, которой подвергались песок и прибрежная вода для удаления комплекса автохтонных микроорганизмов перед заполнением ею мезокосмов, значительно увеличивала выживание кишечной палочки и *Enterococcus faecalis* в воде. В донных осадках также увеличивалось выживание ФИБ при такой обработке. *E. coli* и *E. faecalis* могут выживать по-разному как в воде, так и в донных осадках в зависимости от преобладания питательных веществ и присутствия антагонистических бактерий, которые могут полностью подавлять или замедлять рост других видов бактерий [66]. В [28] предположено, что *Enterococcus faecalis* менее подвержен антагонистическому влиянию других бактерий в сравнении с *E. coli*.

Во многих исследованиях описываются разнообразные факторы (солнечная радиация, адсорбция на грунте, поедание санитарно-показательных бактерий простейшими жгутиковыми и т. д.), влияющие на выживаемость ФИБ в окружающей среде [42, 45, 49, 67].

**Химический состав разных типов исследуемых вод.** Концентрации биогенных элементов в июньских пробах АО были схожи с таковыми в урезовой воде на ст. “Черная” (табл. 2; рис. 6). Таким образом, во время дождя (11 июня) и на следующий день (12 июня) концентрации биогенных элементов в прибрежной воде оказались схожими (рис. 6). Нужно отметить, что в сентябрьских пробах в АО, выпавших 21 сентября, содержались аммоний и нитрат в концентрациях, в несколько раз превышающих таковые в урезовой воде в день до и после выпадения АО. Такой практически неизменный состав биогенных элементов в урезовой воде, вероятно, связан с потреблением этих форм азота (аммония, нитрата) растительностью в толще воды (фитопланктоном) или с большим разбавлением байкальской водой. Таким образом, АО в данном конкретном случае не привели к ухудшению качества прибрежной воды.

Отмечено, что концентрации фосфатов в июне на четырех трансектах из пяти превышали их концентрации в сентябре. Исключение составила трансекта у гостиницы “Маяк”. В интерстициальной воде в этой точке концен-

трации фосфатов были выше в июне, тогда как в пробах урезовой и придонной воды в сентябре они превышали июньские соответственно в 2.6 и 3.9 раза. Это может быть связано с периодичностью функционирования данной гостиницы, количеством ее посетителей в августе и сентябре и герметичностью используемого септика. Места отбора проб воды, особенно придонной, вполне могут соответствовать местам субаквальной разгрузки подземных вод, загрязненных стоками от объектов туристической инфраструктуры [16]. Высокое содержание минерального фосфора в интерстициальных водах, например в лунке в пади Жилище в июне (0.043 мг/л), характерно в основном для районов, испытывающих заметную антропогенную нагрузку [18].

Отмеченное в сентябре 2022 г. на ст. “Стационар” низкое содержание кислорода в интерстициальной воде, вероятно, связано с расходом его на деструкцию органического вещества (водоросли, листья), выбрасываемого штормами на берег в этом районе. С разложением органического вещества чаще всего связаны и высокие концентрации соединений азота и фосфора в интерстициальной воде. Так как концентрации минеральных форм азота и фосфора и общее их содержание в придонной воде выше, чем в приурезовой воде, то можно предположить, что причиной может быть как разложение органических веществ, захороненных на дне между камнями, так и субаквальная разгрузка грунтовых вод с высокой концентрацией этих компонентов.

**Связь ФИБ с химическим составом воды.** Проведен корреляционный анализ, и определена положительная корреляция между этими дву-

мя бактериальными индикаторными группами ( $r$  составляет 0.59;  $p < 0.05$ ) в прибрежной воде, что говорит о том, что *E. coli* и энтерококки могут иметь схожие источники, характеристики выживания и транспортную динамику в урезовой воде. Также *E. coli* и энтерококки имеют умеренную положительную корреляцию с концентрацией  $\text{HCO}_3^-$  ( $r$  составляет 0.79 и 0.6 соответственно;  $p < 0.05$ ), особенно это ярко выражено в лунках (табл. 4). Это может быть обусловлено тем, что *E. coli*, например, требует наличия бикарбоната в качестве метаболического субстрата во время нормального роста, поэтому достаточное его количество поддерживает сохранение клеток *E. coli* в окружающей среде [50]. Умеренная положительная корреляция наблюдается в интерстициальной воде у энтерококков с органическим азотом ( $r$  составляет 0.63,  $p < 0.05$ ), это указывает на то, что питательное обогащение воды может быть важно для выживания бактерий [54]. Положительная корреляция между бактериальными индикаторами и соединениями азота отмечена в [31]: эти организмы могут следовать за источниками питания, используя хемотаксис, или, возможно, выживать дольше или реплицироваться быстрее в присутствии доступного азота [31]. У *E. coli* в лунке наблюдается умеренная положительная корреляция с ПО, которая показывает общее загрязнение воды легкогидролизуемыми органическими соединениями ( $r$  составляет 0.68,  $p < 0.05$ ). Таким образом, можно предположить, что в загрязненной остатками органических соединений и с повышенным содержанием минеральных веществ воде сопутствующим может быть и бактериальное загрязнение. Нужно отметить, что кишечная палочка имеет умеренную отрицательную корреляцию с фосфатом в лунке ( $r$  составляет  $-0.73$ ,  $p < 0.05$ ) и с натрием на урезе ( $r$  составляет  $-0.54$ ).

**Таблица 4.** Коэффициенты корреляции Спирмена между различными параметрами, определенными в результате исследования (полужирный шрифт – достоверные значения коэффициентов корреляции; ноль – незначимые значения коэффициентов корреляции (уровень значимости  $< 0.05$ ); лу – лунка, ур – урез)

	Log 10 энтерококки	Log 10 <i>E. coli</i>	$\text{HCO}_3^-$	$\text{N}_{\text{орг}}$	ПО	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{PO}_4^{3-}_{\text{мин}}$	$\text{P}_{\text{общ}}$	$\text{P}_{\text{орг}}$	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Cl}^-$
Log10 энтерококки	–	<b>0.59</b> (ур)	<b>0.6</b> (лу)	<b>0.63</b> (лу)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Log10 <i>E. coli</i>	<b>0.59</b> (ур)	–	<b>0.79</b> (лу)	0	<b>0.68</b> (лу)	0	<b>-0.73</b> (лу)	0	0	<b>-0.54</b> (ур)	0	0	0

## ВЫВОДЫ

Качество воды по санитарно-микробиологическим и гидрохимическим показателям в прибрежной зоне у пос. Б. Коты в июне и сентябре 2022 г., в целом, соответствовало действующим в РФ нормативам. Эксперименты по выживаемости *in situ* позволяют сделать вывод, что фекальные энтерококки и *E. coli* дольше сохраняют физиологически активное состояние в интерстициальных водах прибрежного грунта в отсутствие освещенности, чем в прибрежной воде оз. Байкал при дневной освещенности, что может быть связано с губительным влиянием УФ-света на бактерии и с большим запасом питательных веществ в интерстициальной воде. Таким образом, согласно результатам исследования, интерстициальные воды зоны заплеска оз. Байкал могут служить временным резервуаром санитарно-показательных бактерий, обеспечивая более длительное их сохранение.

Химический состав АО, по данным настоящего исследования, не влиял на показатели концентраций биогенных элементов в прибрежных водах в оба месяца исследования. Значительное количество АО (34 мм) в июне 2022 г. оказало влияние на численность ФИБ в прибрежной воде, увеличив ее, тогда как меньшее количество АО (до 2.7 мм) в сентябре 2022 г. не оказало подобного воздействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барам Г.И., Верещагин А.Л., Голобокова Л.П. Применение микроколоночной высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ-детектированием для определения анионов в объектах окружающей среды // Аналит. химия. 1999. Т. 54. № 9. С. 962–965.
2. Горшкова А.С., Мальник В.В., Косторнова Т.Я., Потанская Н.В., Тимошкин О.А. Распределение бактерий — индикаторов загрязнения в заплесковой зоне озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2020. Т. 41. № 2. С. 90–98.
3. ГОСТ 31942-2012. Вода. Отбор проб для микробиологического анализа.
4. ГОСТ 24849-2014. Межгосударственный стандарт. Вода. Методы санитарно-бактериологического анализа для полевых условий. М.: Стандартинформ, 2015.
5. Домышева В.М., Голобокова Л.П., Погодаева Т.В., Томберг И.В., Сакирко М.В. О постоянстве ионного состава воды оз. Байкал // Материалы науч. конф. “Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов”. Иркутск: ИГ СО РАН, 2005. С. 410–412.
6. Кравцова Л.С., Ижболдина Л.А., Ханаев И.В., Помазкина Г.В., Домышева В.М., Кравченко О.С., Грачев М.А. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в прибрежной части залива Лиственничный озера Байкал // ДАН. 2012. Т. 447. № 2. С. 227–229.
7. Лухнёв А.Г., Тимошкин О.А. Новый пробоотборник для придонной воды прибрежной зоны водоемов // Изв. ИГУ. Сер. Биология. Экология. 2019. Т. 28. С. 101–107.
8. Майкова О.О., Букичук Н.А., Кравцова Л.С., Онищук Н.А., Сакирко М.В., Небесных И.А., Липко И.А., Ханаев И.В. Спонгиофауна озера Байкал в системе мониторинга за шесть лет наблюдений // Сиб. экол. журн. 2023. Т. 1. С. 11–24.
9. Мальник В.В., Сутурин А.Н., Горшкова А.С., Штыкова Ю.Р., Тимошкин О.А. Качество воды мелководной зоны озера Байкал по санитарно-микробиологическим показателям // География и природ. ресурсы. 2022. №2. С. 84–93.
10. 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 качества воды в притоках южного Байкала (зал. Лиственничный) // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 5. С. 533–543.
11. Подлесная Г.В., Галачьянц А.Д., Штыкова Ю.Р., Сулова М.Ю., Зименс Е.А., Макаров М.М., Тимошкин О.А., Белых О.И. Санитарно-микробиологическая оценка качества вод залива Лиственничный в период экстремальной водности озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2022. Т. 5. С. 163–169.
12. 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 (с изменениями и дополнениями)”. [Электронный ресурс]. [http://www.ekan.ru/sites/docs/PDK\\_W\\_RH.pdf](http://www.ekan.ru/sites/docs/PDK_W_RH.pdf)
13. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / Под ред. Л.В. Боевой. Ростов-на-Дону: НОК, 2009. 1032 с.
14. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов: Метод. указания. МУК 4.2.1884-04, 2004

15. 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/573500115/> (дата обращения: 19.07.2022)
16. Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханав И.В., Минаев А.В., Минаев В.В. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали оз. Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природ. ресурсы. 2016. № 6. С. 34–53.
17. Тимошкин О.А., Бондаренко Н.А., Волкова Е.А., Томберг И.В., Вишняков В.С., Мальник В.В. Массовое развитие зеленых нитчатых водорослей родов *Spirogyra* Link и *Stigeoclonium* Kutz. (CHLOROPHYTA) в прибрежной зоне Южного Байкала // Гидробиол. журн. 2014. № 5. С. 15–26.
18. Томберг И.В., Сакирко М.В., Домышева В.М., Сезько Н.П., Лопатина И.Н., Башенхаева Н.В., Филевич Е.А., Куликова Н.Н., Попова О.В., Мальник В.В., Лухнев А.Г., Зайцева Е.П., Потанская Н.В., Зверева Ю.М., Тимошкин О.А. Первые сведения о химическом составе интерстициальных вод заплесковой зоны озера Байкал // Изв. ИГУ. Сер. Биология. Экология. 2012. Т. 5. № 3. С. 64–74.
19. Фомин Г.С. Вода. Контроль химический, бактериальный и радиационной безопасности по международным стандартам. М.: Протектор, 2000. 840 с.
20. Чебунина Н.С., Онищук Н.А., Нецветаева О.Г., Ходжер Т.В. Динамика содержания минеральных форм азота в водотоках и атмосферных осадках поселка Листвянка (Южный Байкал) // Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле. 2018. Т. 24. С. 124–139.
21. Ackerman D., Weisberg S.B. Relationship between rainfall and beach bacterial concentrations on Santa Monica bay beaches // J. Water Health. 2003. V. 1. P. 85–89.
22. An Y-J., Kampbell D.H., Breidenbach P.G. *Escherichia coli* and total coliforms in water and sediments at lake marinas // Environ. Pollut. 2002. V. 120. P. 771–778.
23. Bondarenko N.A., Tomberg I.V., Shirokaya A.A., Belykh O.I., Tikhonova I.V., Fedorova G.A., Netsvetaeva O.G., Eletskaaya E.V., Timoshkin O.A. *Dolichospermum lemmermannii* (Nostocales) bloom in world's deepest Lake Baikal (East Siberia): abundance, toxicity and factors influencing growth // Limnol. Freshwater Biol. 2021. № 1. P. 1101–1110.
24. Davies-Colley R.J., Bell R.J., Donnison A.M. Sunlight inactivation of enterococci and fecal coliforms in sewage effluent diluted in Seawater // Appl. Environ. Microbiol. 1994. V. 60. P. 2049–2058.
25. Domyшева V., Vorobyeva S., Golobokova L., Netsvetaeva O., Onischuk N., Sakirko M., Khuriganova O., Fedotov A. Assessment of the Current Trophic Status of the Southern Baikal Littoral Zone // Water. 2023. V. 15. № 6. P. 1–14.
26. Economy L.M., Wiegner T.N., Strauch A.M., Awaya J.D., Gerken T. Rainfall and streamflow effects on estuarine *Staphylococcus aureus* and fecal indicator bacteria concentrations // J. Environ. Qual. 2019. V. 48. P. 1711–1721.
27. Eletskaaya E.V., Tomberg I.V. The concentration of mineral and total phosphorus in the coastal water of southeast coast of Lake Baikal // Limnol. Freshwater Biol. 2020. V. 4. P. 896–898.
28. Feng F., Goto D., Yan T. Effects of autochthonous microbial community on the die-off of fecal indicators in tropical beach sand // FEMS Microbiol. Ecol. 2010. V. 74. P. 214–225.
29. Fujioka R.S., Hashimoto H.H., Siwak E.B., Young R.H. Effect of sunlight on survival of indicator bacteria in seawater // Appl. Environ. Microbiol. 1981. V. 41. P. 690–696.
30. Funari E., Mangenelli M., Sinisi L. Impact of climate change on waterborne diseases // Ann. Ist. Super Sanita. 2012. V. 48. P. 473–487.
31. Gagliardi J.V., Karns J.S. 2000. Leaching of *Escherichia coli* O157:H7 in diverse soils under various agricultural management practices // Applied Environ. Microbiol. 2000. V. 66. P. 877–883.
32. Hartz A., Cuvelier M., Nowosielski K., Bonilla T.D., Green M., Esiobu N., McCorquodale D.S., Rogerson A. Survival potential of *Escherichia coli* and enterococci in subtropical beach sand: implications for water quality managers // J. Environ. Qual. 2008. V. 37. P. 898–905.
33. Hofstra N. Quantifying the impact of climate change on enteric waterborne pathogen concentrations in surface water // Curr. Opin. Environ. Sustain. 2011. V. 3. P. 471–479.
34. [https://ru.wikipedia.org/Большие Коты/](https://ru.wikipedia.org/Большие_Коты/)
35. <https://bdex.ru/naselenie/irkutskaya-oblast/n/irkutskiy/bolshie-koty/>
36. <http://www.gnu.org/software/pspp/>
37. Jozic S., Morovic M., Solic M., Krstulovic N., Ordulj M. Effect of solar radiation, temperature and salinity on the survival of two different strains of *E. coli* // Fresenius Environ. Bull. 2014. V. 23. P. 1852–1859.
38. Karunkaran K., Thamilarasu P., Sharmila R. Statistical study on physicochemical characteristics of groundwater in and around Namakkal, Tamilnadu, India // E-J. Chem. 2009. V. 6 (3). P. 909–914.
39. Khanaeva I.V., Kravtsova L.S., Maikova O.O., Bukshuk N.A., Sakirko M.V., Kulakova N.V., Butina T.V., Nebesnykh I.A., Belikov S.I. Current state of the sponge fauna (Porifera: Lubomirskiidae) of Lake Baikal: Sponge disease and the problem of conservation of diversity // J. Great Lakes Res.

2018. V. 44. № 1. P. 77–85.
40. Kleinheinz G.T., McDermott C.M., Hughes S., Brown A. Effects of rainfall on *E. coli* concentrations at Door County, Wisconsin beaches // *Int. J. Microbiol.* 2009. V. 2009. 876050.
  41. Koirala S.R., Gentry R.W., Perfect E., Schwartz J.S., Saylor G.S. Temporal variation and persistence of bacteria in streams // *J. Environ. Qual.* 2008. V. 37. P. 1559–1566.
  42. Korajkic A. Discrimination of human and non-human sources of fecal pollution in Gulf of Mexico waters by microbial source tracking methods and the investigation of the influence of environmental factors on *E. coli* survival. Doctoral Dissertation. Ph.D. Biology. Tampa: USF Tampa Graduate Theses and Dissertations, 2010. 197 p.
  43. 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 // *Great Lakes Res.* 2014. V. 40. P. 441–448.
  44. Kravtsova L., Vorobyeva S., Naumova E., Izhboldina L., Mincheva E., Potemkina T., Pomazkina G., Rodionova E., Onishchuk N., Sakirko M., Nebesnykh I., Khanaev I. Response of Aquatic Organisms Communities to Global Climate Changes and Anthropogenic Impact: Evidence from Listvennichny Bay of Lake Baikal // *Biol.* 2021. V. 10. № 9. P. 1–22.
  45. Lleo M.M., Bonato B., Benedetti D., Canepari P. Survival of enterococcal species in aquatic environments // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2005. V. 54. P. 189–196.
  46. Lucas F.S., Therial C., Goncalves A., Servais P., Rocher V., Mouchel J.-M. Variation of raw wastewater microbiological quality in dry and wet weather conditions // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2014. V. 21. P. 5318–5328.
  47. Majedul Islam M.M., Hofstra N., Atikul Islam Md. The impact of environmental variables on faecal indicator bacteria in the Betna River Basin, Bangladesh // *Environ. Process.* 2017. V. 4. P. 319–332.
  48. Malnik V.V., Yamamuro M., Tomberg I.V., Molozhnikova E.V., Bukin Y.S., Timoshkin O.A. Lacustrine, wastewater, interstitial and fluvial water quality in the Southern Lake Baikal region // *J. Water Health.* 2022. V. 20. № 1. P. 23–40.
  49. Menon P., Billen G., Servais P. Mortality rates of autochthonous and fecal bacteria in natural aquatic ecosystems // *Water Res.* 2003. V. 37. P. 4151–4158.
  50. Merlin C., Masters M., McAteer S., Coulson A. Why is carbonic anhydrase essential for *E. coli*? // *J. Bacteriol.* 2003. V. 185 (21). P. 6415–6424.
  51. Onishchuk N.A., Tomberg I.V., Khodzher T.V. Features of Interannual Dynamics of the Hydrochemical Parameters of Baikal Tributaries near the Village of Listvyanka // *Geogr. Natural Resour.* 2022. V. 43. P. 50–55.
  52. Ordulj M., Jozic S., Baranovich M., Krzelj M. The effect of precipitation on the microbial quality of bathing water in areas under anthropogenic impact // *Water.* 2022. V. 14 (4). P. 527.
  53. Park K., Jo M.R., Kim Y.K., Lee H.J., Kwon J.Y., Son K.T., Lee T.S. Evaluation of the effects of the inland pollution sources after rainfall events on the bacteriological water quality in Narodo area, Korea // *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 2012. V. 45. P. 414–422.
  54. Rosen B.H. *Waterborne Pathogens in Agricultural Watersheds.* Burlington: United States Department of Agriculture, 2000. 64 p.
  55. Sakirko M.V., Domysheva V.M., Pestunov D.A., Netsvetava O.G., Panchenko M.V. Concentration of nutrients in the water of Southern Baikal in summer // *Proc. SPIE.* 2015. T. 9680. № 968045. P. 1–7.
  56. Sampson R.W., Swiatnicki S.A., McDermott C.M., Kleinheinz G.T. The effects of rainfall on *Escherichia coli* and total coliform levels at 15 Lake Superior recreational beaches // *Water Resour. Manag.* 2006. V. 20. P. 151–159.
  57. Schilling K.E., Zhang Y.-K., Hill D.R., Jones C.S., Wolter C.F. Temporal variations of *Escherichia coli* concentrations in a large Midwestern river // *J. Hydrol.* V. 365. P. 79–85.
  58. Sinton L.W., Davies-Colley R.J., Bell R.G. Inactivation of enterococci and faecal coliforms from sewage and meatworks effluents in seawater chambers // *Appl. Environ. Microbiol.* 1994. V. 60. P. 2040–2048.
  59. Suslova M.Yu., Podlesnaya G.V., Zimens E.A., Tomberg I.V., Belykh O.I., Fedotov A.P. Sanitary-microbiological characteristics of the coastal zone of Lake Baikal during the seasonal change in the lake level in 2022 // *Limnol. Freshwater Biol.* 2022. № 6. C. 1724–1727.
  60. Technical Manual for Wet Deposition Monitoring in East Asia-2010. November 2010. Network Center for EANET. 112 p.
  61. 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., Lukhnev A.G., Medvezhonkova O.V., Nepokrytykh A.V., Pasyukova E.M., Poberezhnaya A.E., Potapskaya 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? // *J. Great Lakes Res.* 2016. V. 42.

- P. 487–497.
62. *Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N., Tomberg I.V., Malnik V.V., Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Shirokaya A.A., Sinyukovich 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) // *J. Great Lakes Res.* 2018. V. 44. № 2. P. 230–244.
63. *Vermeulen L., Hofstra N.* Influence of climate variables on the concentration of *Escherichia coli* in the Rhine, Meuse, and Drentse Aa during 1985–2010 // *Reg. Environ. Chang.* 2013. V. 14. P. 307–319.
64. *Vukic Lusic D., Kranjcevic L., Macesic S., Lusic D., Josic S., Linsak Z., Bilajac L., Grbcic L., Bilajac N.* Temporal variations analyses and predictive modeling of microbiological seawater quality // *Water. Res.* 2017. V. 119. P. 160–170.
65. *Walters S.P., Thebo A.L., Boehm A.B.* Impact of urbanization and agriculture on the occurrence of bacterial pathogens and stx genes in coastal waterbodies of central California // *Water. Res.* 2011. V. 45. P. 1752–1762.
66. *Wanjugi P., Harwood V.* The influence of predation and competition on the survival of commensal and pathogenic fecal bacteria in aquatic habitats // *Environ. Microbiol.* 2013. V. 15 (2). P. 517–526.
67. *Wcislo R., Chrost R.J.* Survival of *Escherichia coli* in freshwater // *Polish J. Environ. Stud.* 2000. V. 9 (3). P. 215–222.
68. *Zhang W., Wang J., Fan J., Gao D., Ju H.* Effects of rainfall on microbial water quality on Qingdao № 1. Bathing Beach, China // *Mar. Pollut. Bull.* 2013. V. 66. P. 185–190.