

Научная статья
УДК 7.046.3
EDN FPWXWD
DOI 10.17150/2500-2759.2022.32(2).397-406



ИЗМЕНЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО СООБЩЕСТВА В ЛИТОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ЭКОСИСТЕМЫ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОЗЕРА БАЙКАЛ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

В.А. Верхозина¹, О.А. Белых², Е.В. Верхозина³

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

² Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

³ Институт земной коры, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация

Информация о статье

Дата поступления
27 марта 2022 г.

Дата принятия к печати
8 июня 2022 г.

Дата онлайн-размещения
23 июня 2022 г.

Ключевые слова

Антибиотикорезистентность;
бактерии; экосистема озера
Байкал; антропогенное
влияние; микробиологический
мониторинг

Аннотация

В статье обсуждается вопрос загрязнения оз. Байкал бытовыми стоками его селитебной и рекреационной зон, несущими в водоем антибиотики широкого спектра действия. Рассматривается динамика антропогенного влияния на экосистему озера в связи с растущей на фоне пандемии рекреационной нагрузкой на участок мирового природного наследия. Анализируется риск распространения устойчивости автохтонной микробиоты водоема к антибиотикам через факторы окружающей среды. Цель работы заключалась в выявлении устойчивости бактерий в разных экотопах Байкала к поллютантам — антибиотикам. Исследование проводилось с помощью микробиологического анализа. В его рамках было осуществлено определение устойчивости бактерий к 14 лекарственным препаратам по методикам Госсанэпиднадзора Минздрава России. В статье указаны многолетние точки отбора проб на побережье Байкала и дана оценка загрязнения его экосистемы. Обосновано предложение проводить мониторинг в литоральной зоне экосистемы оз. Байкал и на побережье Малого моря для микробиологического анализа состояния водоема. Высказано мнение о необходимости внедрения системы сбора просроченных лекарственных средств, что позволит внести вклад в сохранение уникальной экосистемы оз. Байкал.

Original article

CHANGES IN THE BACTERIAL COMMUNITY IN THE LITTORAL ZONE OF THE ECOSYSTEM OF THE SOUTHERN PART OF LAKE BAIKAL UNDER THE INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC LOAD

Valentina A. Verkhozina¹, Olga A. Belykh², Elena V. Verkhozina³

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

² Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation

³ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation

Article info

Received
March 27, 2022

Abstract

The article discusses the issue of the pollution of the residential and recreational areas of Lake Baikal with residential wastewater, which brings broad-spectrum antibiotics into the lake. The dynamics of the

Accepted
June 8, 2022

Available online
June 23, 2022

Keywords

Antibiotic resistance; bacteria;
ecosystem of Lake Baikal;
anthropogenic influence;
microbiological monitoring

Обеспечение экологической безопасности путем решения многочисленных экологических проблем на региональном уровне является приоритетом национальной экологической политики России [1–3]. Как показывают последние политические события, связанные с возможностью введения ЕС новых санкций против России, последствия санкций могут коснуться и оз. Байкал, уникальность экосистемы которого, а также экосистемы прилегающих к нему территорий юридически признана — озеро включено в Список объектов Всемирного наследия.

В литературных источниках много говорится о проблеме загрязнения водных экосистем мусором и нефтепродуктами [4], однако проблема попадания в воду лекарственных средств и их влияния на состояние водоемов изучена в недостаточной мере. Какую именно угрозу для речных и морских экосистем представляют фармацевтические препараты, рассмотрим на примере Байкала. Известно, что при попадании в почву и воду лекарства наносят вред как окружающей среде, так и здоровью человека [5]. Однако ученые все еще мало знают о глобальном распространении фармацевтических препаратов в водных артериях. Исследования, позволяющие оценить данную угрозу, охватывают около 75 стран мира. По большей части это территория Северной Америки и Западной Европы, остальные регионы все еще остаются мало изученными с данной точки зрения [6]. Группой исследователей из Йоркского университета было показано, что более чем в 25 % из 258 исследованных рек содержатся активные фармацевтические ингредиенты на уровне предельно допустимых концентраций для водных организмов.

anthropogenic influence on the ecosystem of the lake due to the growing recreational load caused by the pandemic on the area of the world natural heritage is considered. The risk of the spread of antibiotic resistance of the local microbiota through the factors of the environment is analyzed. The purpose of the paper was to reveal the resistance of bacteria in different ecotopes of Baikal to pollutants — antibiotics. The research was conducted with the help of microbiological analysis. During the research, resistance of bacteria to 14 medicinal drugs was revealed using the techniques of State Sanitary and Epidemiological Surveillance Department of Ministry of Health of the Russian Federation. Long-time sampling points along the coastline of Baikal are shown and the pollution of its ecosystem is assessed. A proposal to conduct monitoring in the littoral area of Baikal's ecosystem and along the coastline of Maloe More for microbiological analysis of the state of the lake is substantiated. An opinion on necessity for introducing a system of collecting expired medicinal drugs was expressed. It will allow us to contribute to the preservation of the unique ecosystem of lake Baikal.

Двумя наиболее часто обнаруживаемыми в водах фармацевтическими препаратами были метформин, используемый для лечения диабета второго типа, и карбамазепин, который применяют для лечения эпилепсии и нервных расстройств. Были выявлены высокие концентрации кофеина и никотина, а также парацетамола. Наиболее высокий уровень допустимого загрязнения водоемов характерен для стран с низким и средним уровнем доходов населения, где, как правило, плохо налажена система сброса сточных вод, а также для регионов, где располагается фармацевтическое производство [7].

Загрязнение природных вод лекарственными препаратами и прекурсорами, кроме того что представляет серьезную угрозу для окружающей среды, создает значительную нагрузку на систему здравоохранения стран мира.

Лекарства попадают в водоемы по следующей схеме: химические вещества применяются для лечения человека и животных, они оказывают на нас терапевтическое действие, а затем покидают наш организм. Сейчас известно, что даже самые эффективные современные очистные сооружения не способны полностью разложить эти соединения на простые элементы до того, как они попадут в естественные водоемы [8]. Воздействие многих из наиболее распространенных фармацевтических соединений на водные экосистемы исследуется. Так, обнаружено, что контрацептивные средства могут влиять на развитие и размножение рыб. Ученые прогнозируют, что ситуация будет лишь ухудшаться, поскольку антибиотики широко используются в животноводстве и промышленном рыбоводстве. Прямо сейчас предлагается решение проблемы путем правильного использования

и утилизации лекарств. В дальнейшем потребуются значительные усилия, чтобы создать более эффективную систему очистки вод.

Среди обитателей Байкала микроорганизмы до сих пор остаются наименее изученной группой. Широта экологических ниш озера, разнообразие глубин в сочетании с низкой температурой и низкой минерализацией воды при высоком содержании кислорода создали уникальные условия для жизнедеятельности бактерий. Трудно переоценить роль микроорганизмов в формировании качества воды и самоочищении водоема. Между тем исследования бактериальных сообществ Байкала имеют к настоящему моменту незначительную историю. Микробиологическое наследие XX в. спрессовано в ряде публикаций (см., например: [9]).

Регулярные исследовательские наблюдения сотрудников Лимнологического института СО РАН и Байкальского музея СО РАН позволяют выделить несколько периодов антропогенного освоения Байкала в новейшее время:

1. Период «чистой воды» с 1957 по 1961 г., до времени пуска крупнейшего в СССР целлюлозно-бумажного комбината в г. Байкальске.

2. Период слабого антропогенного освоения с 1962 по 2014 г. — время активной работы БЦБК, сплава леса.

3. Период активного развития туризма с 2014 г. по настоящее время. Увеличение туристического потока привело к нарастанию антропогенной нагрузки на экосистему озера. Повышенный интерес туристов к отдыху на Байкале спровоцировал стремительное застраивание прибрежных территорий разнообразными туристическими объектами, стоки которых в условиях отсутствия централизованной канализации на приозерных землях с подземными водами попадают прямо в Байкал. Растет и интерес представителей бизнеса к озеру. Таким образом, освоение прибрежных территорий, несомненно, оказывает влияние на изменение химического состава воды Байкала. Нерешенной остается и проблема с накопителями БЦБК.

Бактерии, попадая в экосистему озера со смывами с прибрежных территорий, занятых бытовыми и техногенными полигонами и стихийными свалками, размножаются, изменяя качество воды. Давно установлена связь между инфекционными заболеваниями и антропогенным загрязнением водоемов [10; 11]. Микроорганизмы способны чутко реагировать на поступление многих веществ в экосистемы водоемов, что важно на ранней стадии токсического воздействия.

Усиление антропогенного воздействия на уникальное озеро ставит задачу определения устойчивости бактериального сообщества к прессингующим факторам, важнейшим из которых в период пандемии COVID-19 становится влияние антибиотиков. Наши данные свидетельствуют о том, что за эти годы в литорали оз. Байкал наблюдалось увеличение численности хемоорганотрофных бактерий на два-три порядка [12–14]. Одной из важнейших биологических характеристик микроорганизмов является их резистентность к антимикробным препаратам. Антибиотикорезистентность также отмечается у гетеротрофных бактерий, изолированных из различных биотопов литоральной зоны оз. Байкал [15].

Цель работы — формирование системы микробиологического мониторинга для оценки качества и подлинности воды оз. Байкал с использованием современных методов исследования, для анализа влияния окружающей среды на его экосистему и подготовка прогнозных рекомендаций в целях обоснования управленческих решений по обеспечению сохранения качества питьевой воды при распространении объектов экономики на прибрежной территории.

Материалы и методы

Объектами изучения послужили штаммы гетеротрофных бактерий, выделенные из прибрежной зоны оз. Байкал (пос. Листвянка — порт, г. Байкальск — БЦБК, г. Слюдянка — железнодорожный узел), загрязненной бытовыми стоками. Пробы воды, содержащие микроорганизмы, отбирали из пелагиали озера с разных глубинных горизонтов водной толщи (до 1 400 м) и кернов донных осадков до глубины 1,3 км, где не было антропогенного воздействия. Мониторинговые исследования проводились в течение 15 лет начиная с 1996 г.

Поселок Листвянка находится в 70 км от г. Иркутска, поэтому это самое доступное для туристов место (рис. 1). Напротив истока Ангары расположен порт Байкал. На большинстве заходящих в порт судов отсутствует система сбора бытовых отходов. На побережье поселка имеется пристань для парома, напротив нескольких гостиниц также есть пристань. Сауна для дайверов выходит прямо в озеро. Системы гостиниц и кафе находятся в горных распадках. Часто в ручьях, впадающих в Байкал, оказываются остатки пищи, туда же сбрасываются и неочищенные стоки туристических объектов. Курсирование множества судов по Байкалу, функционирование кафе и гостиниц на берегу приводят к попаданию бытовых отходов в озеро.

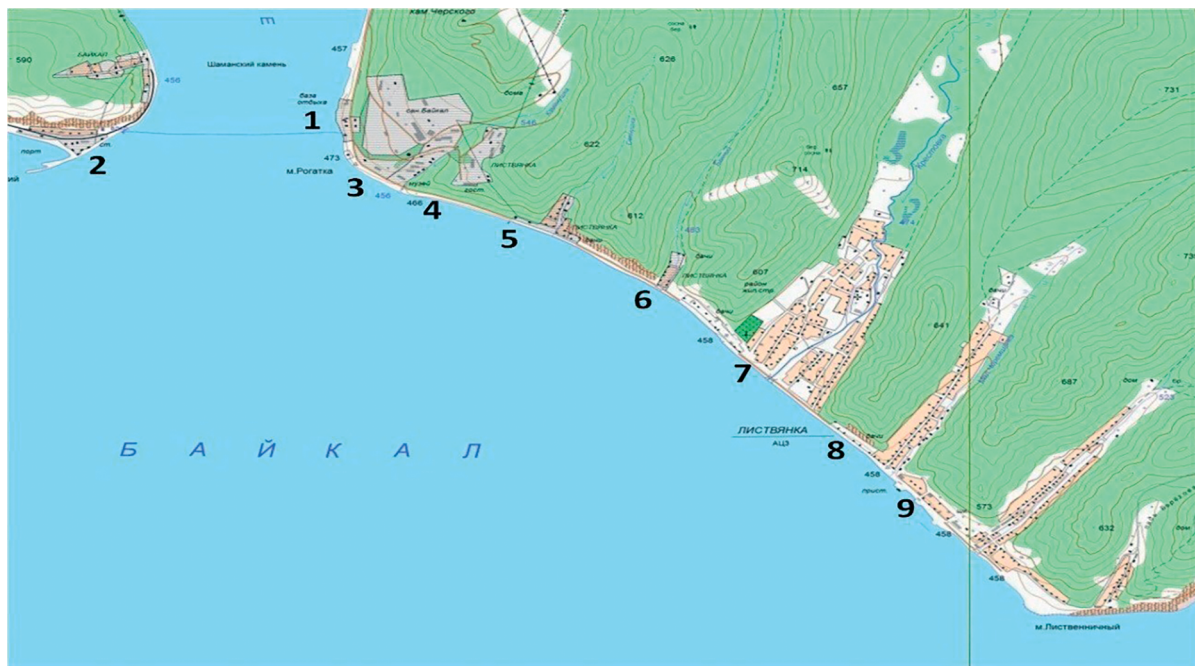


Рис. 1. Пункты сбора материала в прибрежной зоне оз. Байкал, район пос. Листвянка (1 — исток р. Ангары; 2 — порт Байкал; 3 — пристань для парома; 4 — пристань для судов; 5 — сауна для дайверов; 6–9 — гостиницы, кафе)

Город Байкальск расположен на юго-восточном побережье Байкала в 40 км от г. Слюдянки (рис. 2). В районе Байкальска пробы воды были взяты напротив БЦБК,

работавшего с 1966 до 2013 г. Пляжи и зоны отдыха, стоянка для туристов, стоянка кораблей находятся прямо на берегу озера. Места отдыха и стоянки туристов



Рис. 2. Пункты сбора материала в прибрежной зоне оз. Байкал, район г. Байкальска (10 — напротив БЦБК; 11 — площадка Института токсикологии; 12 — пляж; 13, 15 — зона отдыха для туристов; 14 — стоянка плавсредств; 16 — стоянка для туристов)

не оборудованы местами сбора мусора, туалетами, кострищами и т.д.

Исследовались также пробы воды в прибрежье г. Слюдянки (рис. 3). Это туристический центр Иркутской области, поскольку город, во-первых, расположен в одном из доступных для туристов мест, а во-вторых, является крупным железнодорожным узлом. Кроме того, здесь берут начало многие туристические маршруты в Саянские горы.

Суммарно за время исследований выделено и проанализировано более 3 500 штаммов микроорганизмов.

Определение антибиотикоустойчивости бактерий

В соответствии с общепринятыми методиками Госсанэпиднадзора Минздрава России¹ проведено экспериментальное определение устойчивости бактерий к 14 антимикробным препаратам шести фармакологических групп. Указанные методики позволяют выявить минимальную концентрацию фармпрепарата, ингибирующую рост изучаемого микроорганизма. Статистические методы собственных исследований подробно описаны в [16; 17].

¹ Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам : метод. указания. М. : Федер. центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 91 с.

Обсуждение результатов

Исследования микробного сообщества оз. Байкал позволяют констатировать, что в прибрежной части южной чаши штаммы бактерий были выявлены во всех населенных пунктах. Изолированные бактерии обладали резистентностью к широкому набору антибиотиков. Выделенные из глубин озера и кернов глубоководных донных осадков оз. Байкал бактерии оказались чувствительны ко всем 14 антибиотикам шести фармакологических групп: пенициллины, цефалоспорины, аминогликозиды, фторхинолоны, тетрациклины и диаминопиримидины. Общий показатель устойчивости микроорганизмов к антибиотикам оценивался как суммарное по каждому исследованному антибиотику и усредненное по точкам сбора образцов (в районе пос. Листвянка) значение устойчивости в заданный месяц заданного года. Все интегральные показатели были сгруппированы по месяцам.

При анализе полученного материала на резистентность штаммов бактерий к антибиотикам установлено, что исследуемые выборки, усредненные по фактору принадлежности к определенному месяцу отбора проб, не распределены по нормальному закону ($P_value < \alpha$). Это значит, что нами для дисперсионного анализа использовался непараметрический критерий Краскела — Уоллиса. Дисперсионный анализ усреднен-

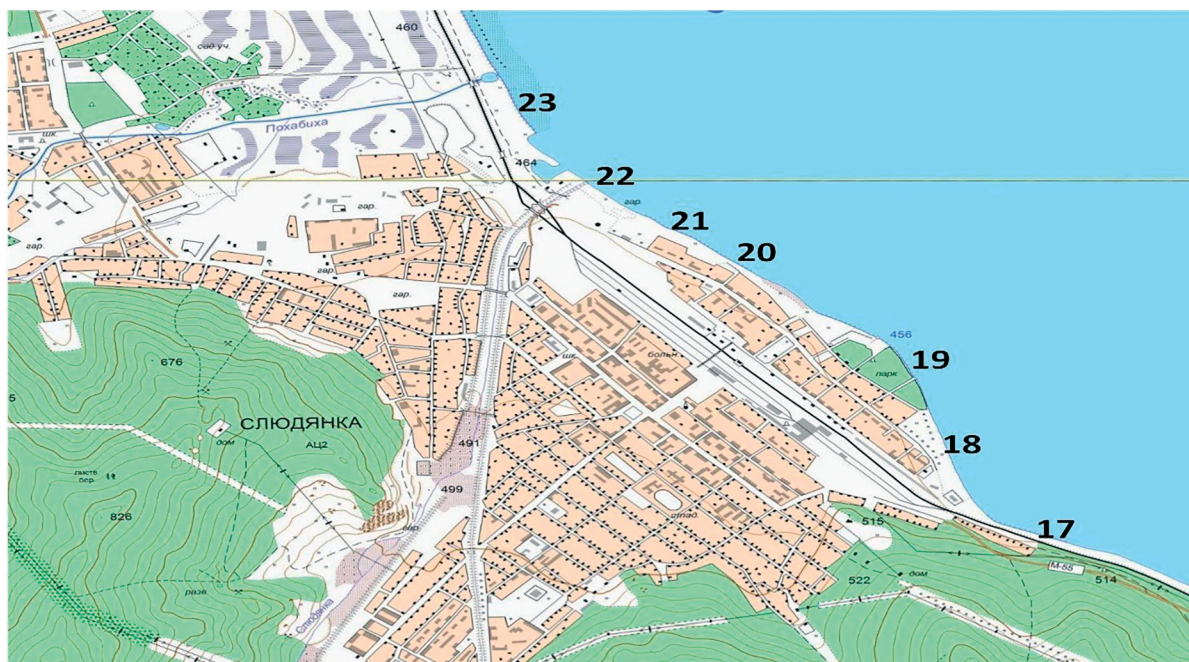


Рис. 3. Пункты сбора материала в прибрежной зоне оз. Байкал, район г. Слюдянки (17 — место отдыха для туристов; 18 — дачи; 19 — кемпинг; 20, 21 — селитебная зона; 22 — железнодорожный вокзал; 23 — городской пляж)

ной устойчивости бактериальных штаммов к антибиотикам, сгруппированных по фактору принадлежности к определенному месяцу отбора проб, представлен на рис. 4.

Дисперсионный анализ усредненной устойчивости бактерий к антибиотикам выявил, что в разные месяцы года усредненная устойчивость достоверно различается ($P_value = 0,003 < \alpha$). В период с июля по ноябрь минимальное значение усредненной устойчивости бактерий к антибиотикам наблюдается в июле, затем начинает увеличиваться и достигает максимума в сентябре. Таким образом, выявлено, что общий показатель устойчивости бактерий к антибиотикам зависит от сезона года. Возможно, это связано с поступлением в литоральную зону озера устойчивых к антибиотикам штаммов в результате жизнедеятельности отдыхающих на Байкале. Разгар туристического сезона здесь отмечается с августа по сентябрь. К этому времени вода максимально прогревается, появляется возможность купаться. Загрязнение берегов, недостаточное количество туалетов, судоходство способствуют поступлению в прибрежные воды бактерий, устойчивых к антибиотикам. Кроме того, в результате интенсивной эксплуатации расположенных на берегах Байкала турбаз в водоем попадают неочищенные стоки (либо вместе с впадающими в Байкал притоками, либо просачиваясь из септиков). Также к концу лета прогреваются глубинные воды озера, увеличивается количество штормов, возможны частые осадки, которые могут

смывать с побережья в воду различный мусор с бактериальным содержанием. Следует учитывать в том числе, что экосистема Байкала лимитирована по азоту [16], и поступление в озеро азотсодержащих веществ изменяет баланс данного элемента в воде, нарушает биогеохимические процессы, в которых он участвует.

Парные коэффициенты корреляции (r) рассчитывались с применением непараметрического коэффициента корреляции Спирмена. Анализ парных коэффициентов корреляции между показателями устойчивости бактерий к антибиотикам позволил распределить последние по трем группам. В первую вошли антибиотики со значением коэффициента корреляции, равным нулю ($r \approx 0$). Резистентность бактериальных штаммов к парам таких антибиотиков формируется независимо друг от друга. Это цефатоксим, цефлосацин, цефазолин. Вторую группу образовали антибиотики с положительным значением коэффициента корреляции ($r > 0$). Увеличение устойчивости бактериальных штаммов к одному антибиотику сопровождается увеличением устойчивости к другому. К этой группе относятся стрептомицин, канамицин, хлорамфеникол, неграмон и рифампицин. Третья группа — пары антибиотиков с достоверными отрицательными значениями коэффициентов корреляции ($r < 0$). Резистентность бактериальных штаммов к одному препарату сопровождалась уменьшением их устойчивости к другому. Это триметоприм, исключение с цефазолином, а также цефа-

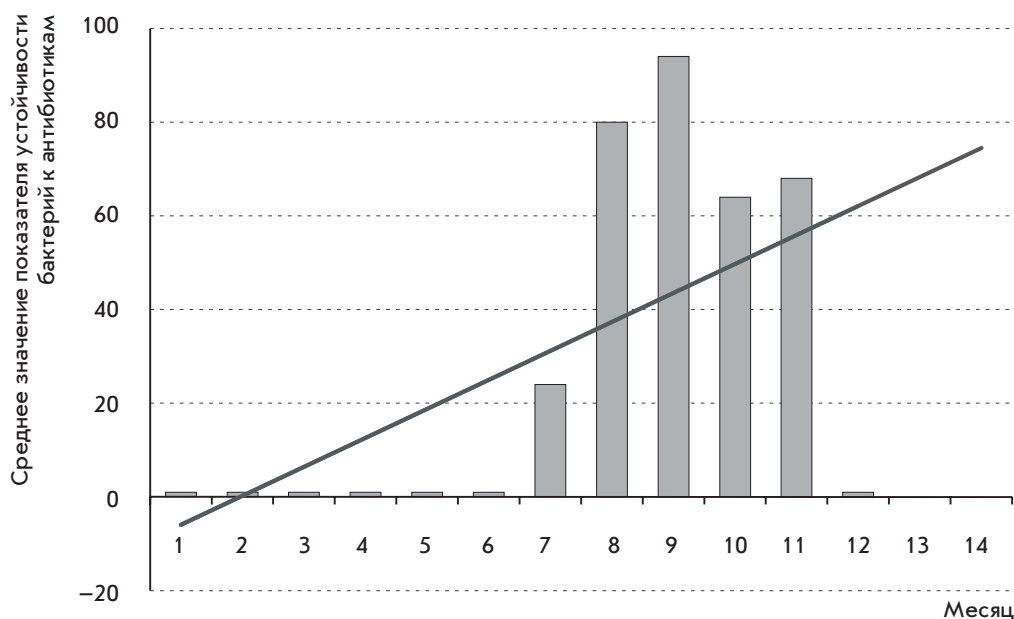


Рис. 4. Годовая линия тренда зависимости интегральных показателей резистентности бактерий к антибиотикам от месяца отбора проб, мкг/мл

золин со стрептомицином с канамицином (табл. 1). Расшифровка названий антибиотиков дана в табл. 2.

Антибиотики по устойчивости к ним бактериальных штаммов с учетом коэффициента вариации (отношение стандартного отклонения σ к среднему) делятся на две плеяды. Первая — антибиотики с небольшими значениями kV устойчивости к ним бактериальных штаммов ($\sigma < 1$). Это такие антибиотики, как ампициллин, триметоприм, хлорамфеникол, невидграммон. Резистентность бактерий к антибиотикам этой группы варьирует в незначительной степени при сезонных явлениях. Вторая плеяда — антибиотики с высокими значениями kV резистентности к ним микробы ($1 < kV < 1,75$). Это стрептомицин, тетрациклин, гентамицин, канамицин, цефазолин, рифампицин, цефазолин, цефатоксим, пefлоксацин. Устойчивость к ним бактериальных штаммов, как было установлено нами ранее, меняется в различные месяцы одного года [17]. «Обращает на себя

внимание факт того, что эти бактериальные штаммы выделены фактически из питьевой воды, так как местное население традиционно берет воду из озера для бытовых нужд и для потребления. Существующая раньше точка зрения, что «бактерии-пришельцы» погибают в холодной воде Байкала, оказалась несостоятельна».

Анализ массива данных выявил, что в селитебных зонах промышленных предприятий и районах рекреационного использования наблюдается изменение микробного сообщества. Появляются новые штаммы бактерий, устойчивых к широкому набору антибиотиков. В чистых фоновых районах (пелагиаль озера, керны донных отложений) таких бактерий не выявлено.

Материалы исследования показали, что чувствительность к антибиотикам микроорганизмов, выделенных из чистых фоновых районов и из районов антропогенного влияния, различается. Полученные данные свидетельствуют, что микробный фон озера неод-

Таблица 1

Значения парных коэффициентов корреляции между показателями устойчивости бактерий к антибиотикам

Антибиотик	T	A	S	K	CH	NEV	GEN	R	CEF	TS	CFT
A	0,00										
S	0,00	0,69									
K	0,00	0,64	0,78								
CH	0,00	0,70	0,77	0,59							
NEV	0,00	0,54	0,50	0,42	0,62						
GEN	0,00	0,37	0,27	0,28	0,378	0,31					
R	0,00	0,68	0,75	0,71	0,69	0,71	0,22				
CEF	0,61	0,00	-0,33	-0,24	0,00	0,00	0,00	0,00			
TS	0,00	-0,48	-0,71	-0,63	-0,54	-0,21	-0,32	-0,55	0,30		
CFT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	
PF	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,0	0,0

Таблица 2

Кодировка названий антибиотиков

Шифр антибиотика	Название антибиотика
S	Стрептомицин
A	Ампициллин
T	Тетрациклин
K	Канамицин
CH	Хлорамфеникол
GEN	Гентамицин
NEV	Невидграммон
R	Рифампицин
CEF	Цефазолин
TS	Триметоприм
CFT	Цефатоксим
PF	Пefлоксацин

нороден и зависит во многом от впадающих притоков, а также от района использования озера человеком.

В настоящее время, кроме разработки управленческой структуры, необходим анализ экологических рисков с точки зрения антропогенного влияния на экосистему Байкала. Это требует не только применения комплексного подхода к исследованию гидрхимических показателей и состояния биоты озера, но и использования современных методик для выявления различных антропогенных факторов. Грамотный экологический мониторинг состояния Байкала с применением современных методик определения различных микробиологических показателей позволит составлять многолетний прогноз последствий принятых решений и предотвращать недопустимый риск, который может не только привести к ухудшению качества воды и состояния экосистемы оз. Байкал, но и вызвать эколого-экономическую катастрофу.

Заключение

Полученные нами результаты позволяют говорить о том, что влияние многих лекарственных препаратов на водные экосистемы подтверждено и требует дальнейшего изучения. Можно предполагать, что экологическая обстановка на Байкале будет ухудшаться, поскольку пандемия обострила

проблему загрязнения вод фармацевтическими препаратами.

Микробные сообщества, выделенные из литоральной части озера (селитерные зоны пос. Листвянка, гг. Байкальска и Слюдянки), уже характеризуются высокой устойчивостью к широкому спектру антибиотиков. Со временем перечень устойчивых штаммов к новым видам антибиотиков будет только расширяться.

Впервые получены сведения о резистентности к антибиотикам гетеротрофных бактерий, выделенных из кернов глубоководных донных осадков, которые антропогенное влияние еще не затронуло. Это дает возможность судить об изменении качества воды в прибрежной части оз. Байкал.

Присутствие лекарственных средств в бытовых стоках прибрежных городов и поселков, туристических кемпингов приведет к развитию устойчивости к ним микробиоты озера и создаст глобальную угрозу для окружающей среды, усилит нагрузку на систему здравоохранения. Необходимо принять решение при возведении жилого сектора строить очистные сооружения. Необходимо развивать эффективные системы очистки воды, сбора медицинского мусора на побережье и утилизации лекарственных средств. Это позволит внести весомый вклад в уменьшение загрязнения экосистемы оз. Байкал.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санина Л.В. Угрозы обеспечения экономической безопасности малого и среднего предпринимательства на региональном уровне (на примере Забайкальского края) / Л.В. Санина, О.А. Чепинога. — DOI 10.34925/EIP.2020.116.3.099. — EDN CXEPBW // Экономика и предпринимательство. — 2020. — № 3 (116). — С. 482–487.
2. Горбунова О.И. Оценка влияния функционирования системы экологического менеджмента на экономическую эффективность деятельности компании / О.И. Горбунова, Л.В. Каницкая. — DOI 10.17513/fr.42559. — EDN JMPHWF // Фундаментальные исследования. — 2019. — № 10. — С. 23–28.
3. Самаруха В.И. Трансформация воспроизводственных процессов в сельском хозяйстве / В.И. Самаруха, М.Ф. Тяпкина. — DOI 10.38197/2072-2060-2020-226-6-224-242. — EDN ВКННННГ // Научные труды Вольного экономического общества России. — 2020. — Т. 226, № 6. — С. 224–242.
4. Фильтрационные возможности сообщества *Lubomirskia baikalensis* в условиях модельного эксперимента / О.А. Белых, Л.А. Глызин, Е.А. Константинова, О.Ю. Глызина. — DOI 10.17150/2500-2759.2019.29(2).179-184. — EDN TNGGQO // Известия Байкальского государственного университета. — 2019. — Т. 29, № 2. — С. 179–184.
5. Ternes T. Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances: the Challenge of Icropollutants in Urban Water Management / T. Ternes, A. Joss. — London : IWA Publishing, 2007. — 468 p.
6. Bhattacharyya P. Advancement Towards Antibiotic Remediation: Heterostructure and Composite Materials / P. Bhattacharyya, S. Basak, S. Chakrabarti. — DOI 10.1002/slct.202100436. — EDN JOCBTG // ChemistrySelect. — 2021. — Vol. 6, no. 29. — P. 7323–7345.
7. Риск распространения антибиотикорезистентности через объекты окружающей среды и продукты питания / Н.С. Антропова, О.В. Ушакова, М.А. Водянова, О.Н. Савостикова. — EDN EQYXXJ // Russian Journal of Rehabilitation Medicine. — 2020. — № 4. — С. 36–51.
8. Современные подходы в системе выявления лекарственного загрязнения вод, включая применение методов иммунохимического анализа / М.А. Чиганова, И.А. Шанин, С.А. Еремин, Г.М. Баренбойм. — EDN WMFLBD // Вода: химия и экология. — 2015. — № 12 (90). — С. 64–76.
9. Максименя Г.Г. Ликвидация некачественной фармацевтической продукции / Г.Г. Максименя. — EDN YWVOXJ // Медицинский журнал. — 2019. — № 1 (67). — С. 25–31.
10. Гетерогенность микробных сообществ поверхностных водоемов по показателям антибиотикорезистентности бактерий / Е.В. Анганова, Е.Д. Савилов, М.Ф. Савченков, Н.Н. Чемезова. — EDN TALSZGZ // Гигиена и санитария. — 2014. — Т. 93, № 4. — С. 19–22.

11. Савилов Е.Д. Проявления инфекционной заболеваемости в условиях экологического неблагополучия / Е.Д. Савилов, С.В. Ильина, Н.И. Брико. — EDN KYWCXD // Эпидемиология и инфекционные болезни. — 2009. — № 5. — С. 34–38.
12. Анализ микробильного сообщества в литоральной зоне южной части экосистемы озера Байкал / Е.В. Верхозина, В.А. Верхозина, В.В. Верхотуров [и др.]. — EDN ZUEHMB. — DOI 10.23968/2305-3488.2017.21.3.100-114 // Вода и экология: проблемы и решения. — 2017. — № 3 (71). — С. 99–112.
13. Мониторинговые исследования микробного сообщества литоральной зоны в районе южного Байкала / В.А. Верхозина, Е.В. Верхозина, В.В. Верхотуров, А.С. Сафаров. — EDN RYXQAJ // Вода: химия и экология. — 2014. — № 3 (69). — С. 66–70.
14. Верхозина Е.В. Устойчивость бактерий озера Байкал к антибиотикам как показатель антропогенной нагрузки на экосистему / Е.В. Верхозина, В.А. Верхозина, О.А. Белых. — EDN MEJJAF. — DOI 10.17150/2500-2759.2021.31(2).241-247 // Известия Байкальского государственного университета. — 2021. — Т. 31, № 2. — С. 241–247.
15. Зименс Е.А. Антибиотикоустойчивость гетеротрофных бактерий, изолированных из различных биотопов литоральной зоны озера Байкал / Е.А. Зименс, Е.В. Суханова, О.И. Белых. — EDN WFQOEA. — DOI 10.17150/2500-2759.2019.29(4).513-522 // Известия Байкальского государственного университета. — 2019. — Т. 29, № 4. — С. 513–522.
16. Применение дисперсионного и корреляционного методов анализа при исследовании антибиотикорезистентности микроорганизмов озера Байкал / Е.В. Верхозина, В.А. Верхозина, Ю.С. Букин, А.С. Сафаров. — EDN XUZOAR // Вода: химия и экология. — 2016. — № 12 (102). — С. 67–73.
17. Analysis of Microbial Community in the Littoral Zone of Southern Lake Baikal Ecosystem / E.V. Verkhozina, V.A. Verkhozina, V.V. Verhoturov [et al.]. — DOI 10.23968/2305-3488.2017.21.3.99-113 // Water and Ecology: Problems and Solutions. — 2017. — No. 3. — P. 99–113.

REFERENCES

1. Sanina L.V., Chepinoga O.A. Threats to Ensure Economic Security of Small and Medium-Sized Enterprises at the Regional Level (for Example Trans-Baikal Territory). *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Journal of Economy and Entrepreneurship*, 2020, no. 3, pp. 482–487. (In Russian). EDN: CXEPBW. DOI: 10.34925/EIP.2020.116.3.099.
2. Gorbunova O.I., Kanitskaya L.V. Evaluation of Influence of Functioning of the Environmental Management System on the Economic Efficiency of the Company's Activity. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2019, no. 10, pp. 23–28. (In Russian). EDN: JPMHWF. DOI: 10.17513/fr.42559.
3. Samarukha V.I., Tyapkina M.F. Transformation of Reproduction Processes in Agriculture. *Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii = Proceedings of the Free Economic Society of Russia*, 2020, vol. 226, no. 6, pp. 224–242. (In Russian). EDN: BKHHEG. DOI: 10.38197/2072-2060-2020-226-6-224-242.
4. Belykh O.A., Glyzin L.A., Konstantinova E.A., Glyzina O.Yu. Filtration Capacities of *Lubomirskia Baicalensis* Biocenosis in Conditions of a Model Experiment. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 179–184. (In Russian). EDN: TNGGQO. DOI: 10.17150/2500-2759.2019.29(2).179-184.
5. Ternes T., Joss A. *Human Pharmaceuticals, Hormones and Fragrances: the Challenge of Icropollutants in Urban Water Management*. London, IWA Publishing, 2007. 468 p.
6. Bhattacharyya P., Basak S. Advancement Towards Antibiotic Remediation: Heterostructure and Composite Materials. *ChemistrySelect*, 2021, vol. 6, no. 29, pp. 7323–7345. EDN: JOCBTG. DOI: 10.1002/slct.202100436.
7. Antropova N.S., Ushakova O.V., Vodyanova M.A., Savostikova O.N. Risk of Antibiotic Resistance Extension via Environmental Objects and Food Products. *Russian Journal of Rehabilitation Medicine*, 2020, no. 4, pp. 36–51. (In Russian). EDN: EQYXXJ.
8. Chiganova M.A., Shanin I.A., Eremin S.A., Barenboim G.M. Modern Approaches in the System of Identification of the Pharmaceutical Water Pollution, Including the Application of Immunochemical Analytical Methods. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: Chemistry and Ecology*, 2015, no. 12, pp. 64–76. (In Russian). EDN: WMFLBD.
9. Maximenya G.G. Destruction of Low-Quality Pharmacological Products. *Meditsinskii zhurnal = Medical Journal*, 2019, no. 1, pp. 25–31. (In Russian). EDN: YWVOXJ.
10. Anganova E.V., Savilov E.D., Savchenkov M.F., Chemezova N.N. Heterogeneity of Microbial Communities of Surface Waters According to Indices of Antibiotic Resistance of Bacteria. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, 2014, vol. 93, no. 4, pp. 19–22. (In Russian). EDN: TALSGZ.
11. Savilov Ye.D., Ilyina S.V., Briko N.I. Manifestations of Infectious Morbidity under Poor Environmental Conditions. *Epidemiologiya i infektsionnye bolezni = Epidemiology and Infectious Diseases*, 2009, no. 5, pp. 34–38. (In Russian). EDN: KYWCXD.
12. Verkhozina E.V., Verkhozina V.A., Verhoturov V.V., Bukin U.S., Safarov A.S. Analysis of Microbial Community in the Littoral Zone of Southern Lake Baikal Ecosystem. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology*, 2017, no. 3, pp. 99–112. (In Russian). EDN: ZUEHMB. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.100-114.
13. Verkhozina V.A., Verkhozina E.V., Verhoturov V.V., Safarov A.S. Monitoring Researches of a Microbial Community of the Littoral Zone Near the Southern Baikal. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: Chemistry and Ecology*, 2014, no. 3, pp. 66–70. (In Russian). EDN: RYXQAJ.
14. Verkhozina E.V., Verkhozina V.A., Belykh O.A. Analysis of the Antibiotic Resistance of Bacteria Isolated from Various Ecological Niches of Lake Baikal Ecosystem. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2021, vol. 31, no. 2, pp. 241–247. (In Russian). EDN: MEJJAF. DOI: 10.17150/2500-2759.2021.31(2).241-247.

15. Zimens E.A., Sukhanova E.V., Belykh O.I. Antibiotic Resistance of Heterotrophic Bacteria Isolated from Various Habitats of the Littoral Area of Lake Baikal. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 513–522. (In Russian). EDN: WFQOEA. DOI: 10.17150/2500-2759.2019.29(4).513-522.

16. Verkhovina E.V., Verkhovina V.A., Bukin U.S., Safarov A.S. The Use of Variance and Correlation Methods of Analysis for the Study of Antibiotic Resistance of Microorganisms of Lake Baikal. *Voda: khimiya i ekologiya = Water: Chemistry and Ecology*, 2016, no. 12, pp. 67–73. (In Russian). EDN: XUZOAR.

17. Verkhovina E.V., Verkhovina V.A., Verhoturov V.V., Bukin U.S., Safarov A.S. Analysis of Microbial Community in the Littoral Zone of Southern Lake Baikal Ecosystem. *Water and Ecology: Problems and Solutions*, 2017, no. 3, pp. 99–113. (In Russian). DOI: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.99-113.

Информация об авторах

Верховина Валентина Александровна — доктор технических наук, профессор, кафедра обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: verhval@mail.ru.

Белых Ольга Александровна — доктор биологических наук, доцент, кафедра отраслевой экономики и управления природными ресурсами, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: BelykhOA@bgu.ru.

Верховина Елена Владимировна — кандидат биологических наук, ведущий инженер, лаборатория геологии мезозоя и кайнозоя, Институт земной коры, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: verhel@crust.irk.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования

Верховина В.А. Изменение бактериального сообщества в литоральной зоне экосистемы южной части озера Байкал под воздействием антропогенной нагрузки / В.А. Верховина, О.А. Белых, Е.В. Верховина. — DOI 10.17150/2500-2759.2022.32(2).397-406. — EDN FPWXWD // Известия Байкальского государственного университета. — 2022. — Т. 32, № 2. — С. 397–406.

Authors

Valentina A. Verkhovina — D.Sc. in Engineering, Professor, Department of Mineral Processing and Environment Protection, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: verhval@mail.ru.

Olga A. Belykh — D.Sc. in Biology, Associate Professor, Department of Industrial Economics and Natural Resources Management, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: BelykhOA@bgu.ru.

Elena V. Verkhovina — Ph.D. in Biology, Senior Engineer, Laboratory of the Mesozoic and the Cenozoic Geology, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: verhel@crust.irk.ru.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

For Citation

Verkhovina V.A., Belykh O.A., Verkhovina E.V. Changes in the Bacterial Community in the Littoral Zone of the Ecosystem of the Southern Part of Lake Baikal under the Influence of Anthropogenic Load. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2022, vol. 32, no. 2, pp. 397–406. (In Russian). EDN: FPWXWD. DOI: 10.17150/2500-2759.2022.32(2).397-406.