

А. Н. СУТУРИН^{1,2}, Е. П. ЧЕБЫКИН^{1,2,3}, В. В. МАЛЬНИК², И. В. ХАНАЕВ^{1,2}, А. В. МИНАЕВ^{1,2},
В. В. МИНАЕВ^{1,2}

¹ Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия, san@lin.irk.ru, mav@lin.irk.ru, min@lin.irk.ru

² Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Уланбаторская, 3, Россия, malnik80@mail.ru

³ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия, cheb@lin.irk.ru

РОЛЬ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ В РАЗВИТИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТРЕССА В ЛИТОРАЛИ ОЗЕРА БАЙКАЛ (АКВАТОРИЯ ПОС. ЛИСТВЯНКА)

Поселок Листвянка (Южный Байкал) — первый район, где были обнаружены признаки экологического кризиса на Байкале. Это наиболее посещаемое место на озере. Ежегодно в пос. Листвянка приезжает свыше миллиона человек. Природоохранная инфраструктура в поселке практически отсутствует. Наибольшую антропогенную нагрузку испытывают подземные воды. Методом электротомографии выявлены размеры и водонасыщенность потоков подземных вод, поступающих из береговой зоны в акваторию озера. Проведенные комплексные исследования показали, что в отличие от поверхностных водотоков, в воде которых содержания биогенных и потенциально антропогенных элементов на отрезке от истока к устью увеличиваются незначительно, в подземных водах устанавливается повышенное химическое и микробиологическое загрязнение. Субаквальная разгрузка подземных вод, загрязненных стоками объектов туристической инфраструктуры, происходит на глубинах более 2 м, что приводит к экологическому стрессу и катастрофической трансформации аквальных биоценозов озера Байкал.

Ключевые слова: экологический кризис, микробиологическое и геохимическое загрязнение, литораль, озеро Байкал.

A. N. SUTURIN^{1,2}, E. P. CHEBYKIN^{1,2,3}, V. V. MALNIK², I. V. KHANAIEV^{1,2}, A. V. MINAEV^{1,2}, AND V. V. MINAEV^{1,2}

¹ Irkutsk Scientific Center SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontova str., 134, Russia, san@lin.irk.ru, mav@lin.irk.ru, min@lin.irk.ru

² Limnological Institute SB RAS, 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 3, Russia, malnik80@mail.ru

³ Institute of Earth's Crust SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontova str., 128, Russia, cheb@lin.irk.ru

THE ROLE OF ANTHROPOGENIC FACTORS IN THE DEVELOPMENT OF ECOLOGICAL STRESS IN LAKE BAIKAL LITTORAL (THE LISTVYANKA SETTLEMENT LAKESCAPE)

Listvyanka settlement (Southern Baikal) was the first area to provide some evidences of ecological crisis on Lake Baikal. This is the most visited place on the lakeshore, with more than one million people coming to visit Listvyanka every year. However, there is practically no nature protection infrastructure in the settlement. Its ground waters are affected by anthropogenic influences to the largest extent. The electrical resistivity tomography method has revealed dimensions of the saturated groundwater flows coming from the littoral zone to discharge into the lake. The conducted integrated studies have revealed that chemical and microbiological pollution of the ground waters is higher versus that of the surface water flows, which shows an insignificant increase in the content of biogenic and potentially anthropogenic elements within a stretch from the outlet to the mouth. Subaquatic discharge of ground waters polluted by waste water from tourist infrastructure facilities occurs at depths of greater than 2 m, which is responsible for both ecological stress and catastrophic transformation of aquatic biocenosis in Lake Baikal.

Keywords: ecological crisis, microbiological and geochemical pollution, littoral, Lake Baikal.

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые значительные изменения в экосистеме литорали озера Байкал обнаружили в 2011 г. в прибрежной зоне пос. Листвянка [1]. Эти изменения выражались в замещении типичных для каменной литорали оз. Байкал поясов фитобентоса сплошным покровом нитчатых водорослей рода *Spirogyra* и *Ulotrix*. На водорослевых матах развиваются биопленки гетеротрофных микроорганизмов, уничтожающих скопления губок. На серии фотографий (рис. 1) показаны изменения отдельного участка с реперной губкой с течением времени. За период с мая по июнь происходит зарастание по-

лигона нитчатыми водорослями, похожее на эвтрофикацию, а с августа по сентябрь начинается уничтожение губок, которое сопровождается снижением обрастаний водорослями каменистого грунта. За период 2011–2016 гг. в результате многочисленных байкальских экспедиций элементы кризисных явлений обнаружены на различных участках побережья Байкала.

Рассматривая причины экологического кризиса в литоральной зоне оз. Байкал, М. А. Грачев [2] указывает на: 1) масштабное развитие нитчатой водоросли рода *Spirogyra*; 2) гибель губок; 3) исчезновение августовского стада желтокрылки; 4) развитие цианобактерий на больных и мертвых губках.

Основные высказываемые гипотезы: 1) эвтрофикация прибрежной зоны; 2) потепление климата; 3) увеличение численности нерпы; 4) вселение нового вида спирогиры; 5) истончение озонового слоя; 6) размножение бакланов; 7) разрушение слоя газовых гидратов; 8) снижение уровня Байкала.

Для побережья пос. Листвянка большинство из этих процессов не характерно. Должны быть выявлены процессы, активизирующиеся на побережье Байкала и в акватории пос. Листвянка с 2010 г., которые способствовали усилению миграционных потоков с территории в водную экосистему и кризисным изменениям последней.

Истинные причины катастрофического преобразования литоральной экосистемы озера не установлены. Предполагается, что одной из них может быть поступление с береговой зоны в озеро неочищенных бытовых стоков, содержащих значительное количество фосфора, соединений азота и других биогенных элементов. Поселок Листвянка, в акватории которого с 2010 г. стали отмечаться экологические изменения, является характерным примером развивающегося туристического центра с отсутствующей природоохранной инфраструктурой. Разработка единых методических подходов в опреде-



Рис. 1. Реперная губка на мелководье пос. Листвянка на трансекте полигона «у Озера»: а — 14.05.2015 г.; б — 15.06.2015 г.; в — 31.08.2015 г.; г — 11.09.2015 г.

лении роли субаквальной разгрузки загрязненных бытовыми стоками грунтовых вод была целью настоящего комплексного исследования с применением геофизических, геохимических, микробиологических методов и водолазного обследования.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

2.1. Описание района работ, отбор проб

Поселок Листвянка расположен в истоке р. Ангары и вытянут вдоль оз. Байкал на 5 км между мысами Рогатка и Лиственничный (рис. 2). Через поселок протекает несколько небольших речек и

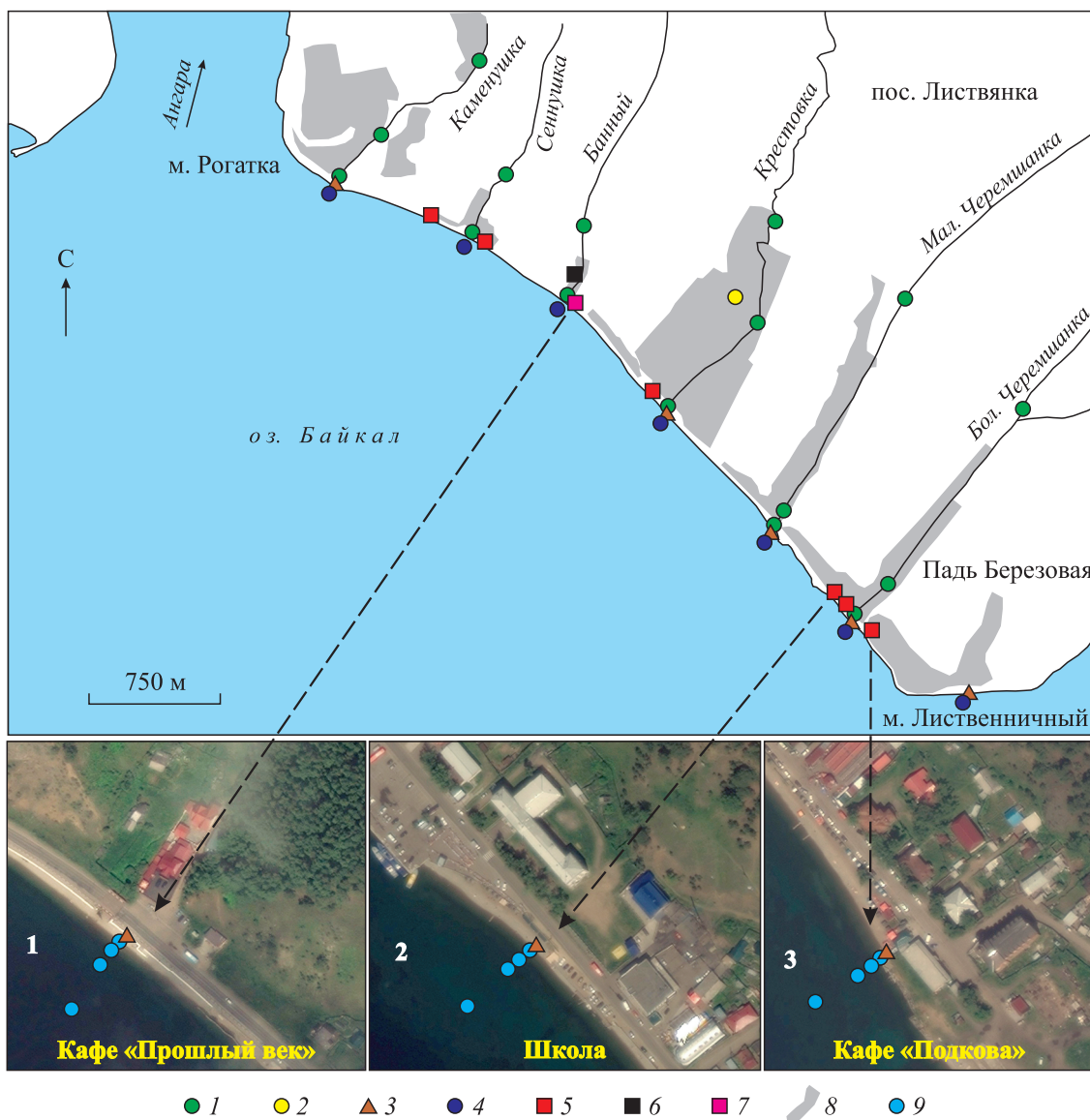


Рис. 2. Карта-схема отбора проб воды.

1 — реки (октябрь 2015), 2 — боковое русло р. Крестовка (октябрь 2015), 3 — лунки вблизи уреза воды (~0,5 м), 4 — прибрежная поверхностная вода (~10 м от берега, октябрь 2015), 5 — скважины в прибрежной зоне (октябрь 2015), 6 — колодец в распадке руч. Банный (июнь 2016), 7 — две рядом расположенные скважины на берегу напротив кафе «Прошлый век» (июнь 2016); 8 — застроенные и огороженные территории. На врезках — космоснимки с указанием мест отбора проб поверхностной и придонной воды на трансектах напротив объектов (кафе «Подкова», пляж вблизи школы, кафе «Прошлый век») на расстоянии 3, 10, 20 и 50 м от уреза воды (усл. зн. 9, июль 2016) и проб интерстициальной воды из лунок вблизи уреза воды (~0,5 м) (усл. зн. 3, июль 2016).

ручьев, впадающих в оз. Байкал. Наиболее крупная из них — р. Крестовка (протяженностью около 15 км). Постройки частного сектора сосредоточены главным образом в распадках рек и вытянуты вдоль русел на расстояние 300–1500 м от берега Байкала (рис. 2, усл. зн. 8). Основное количество муниципальных и туристических объектов расположено по Байкальскому тракту, который тянется по поселку, вплотную примыкая к берегу озера.

Образцы воды отбирались 29 октября 2015 г. из рек выше поселков, в их устьях и из оз. Байкал, примерно в 10 м от берега вблизи устьев рек (см. рис. 2). Были опробованы реки Каменушка, Сеннушка, руч. Банный, Крестовка, Мал. Черемшанка, Бол. Черемшанка. Интерстициальную воду из лунок отбирали в заплесковой зоне оз. Байкал вблизи устьев рек. Были также отобраны пробы воды из глубинного водозабора (500 м) на расстоянии 1,7 км от берега.

30 октября 2015 г. были отобраны образцы воды из шести неглубоких скважин (до 2 м) в прибрежной зоне оз. Байкал. При бурении скважин ориентировались на ранее полученные геофизические данные электротомографии, с помощью которой были обнаружены линзы подземных вод с низким сопротивлением.

Две скважины (на расстоянии 2 м друг от друга) глубиной до 4 м были пробурены 30 июня 2016 г. на берегу оз. Байкал в 15 м восточнее устья руч. Банный (см. рис. 2, усл. зн. 7). Через Байкальский тракт напротив скважин находится кафе «Прошлый век». Бурение скважин осуществлялось с помощью буровой установки 1,5-метровыми полыми составными шнеками. Подземную воду из скважин (обсадной трубой служили полые шнеки) выкачивали перистальтическим насосом с силиконовым шлангом. В первой скважине вода была отобрана с глубин 2,7 и 3,5 м, во второй — 3 и 4 м. Колодезная вода отобрана из колодца на склоне сопки с правого борта руч. Банный, в 150 м от оз. Байкал (см. рис. 2, усл. зн. 6).

Отбор проб поверхностной и придонной воды оз. Байкал проводился 28 и 29 июля 2016 г. на трех трансектах на расстоянии 3, 10, 20 и 50 м от берега (см. рис. 2, врезка). Первый трансект был заложен напротив кафе «Прошлый век» вблизи устья руч. Банный, второй — напротив окончания восточного крыла школы, третий — напротив кафе «Подкова». Места закладки трансектов выбирали на основе полученных данных (октябрь 2015 г., июнь 2016 г.) о высокой концентрации химических и микробиологических компонентов вод в скважинах, пробуренных в зонах с низким сопротивлением грунтов. Отбор проб поверхностной воды осуществляли с борта катамарана «Турист-2», адаптированного для работ на реках и озерах. Придонную воду отбирал водолаз у самого дна с помощью шприцев Жанэ (объемом 150 мл) вдоль размеченного фала. Интерстициальную воду отбирали из лунок в заплесковой зоне на удалении 0,5 м от уреза воды. Местоположения отобранных проб показаны на рис. 2.

Для многоэлементного анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП–МС) образцы воды отбирали одноразовыми полипропиленовыми шприцами объемом 20 мл и в количестве 10 мл сразу фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (0,45 мкм, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные одноразовые полипропиленовые пробирки на 15 мл Greiner bio-one 188271. В качестве консерванта с внутренним стандартом в пробирки предварительно вносили весовым методом 200 мкл 70%-й азотной кислоты (дважды очищенная на суббойлинговом дистилляторе Savillex DST-1000, Япония), содержащей индий (внутренний стандарт) с концентрацией 356 ppb. Пробирки с отобранными образцами фильтрованной воды взвешивали и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (~2 %) и индия (~10 ppb). Все необходимые взвешивания проводили на аналитических весах Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания $\pm 0,0003$ г).

Отбор проб для микробиологического анализа осуществлялся в стерильные 50 мл пробирки Axigen (США) или в 1,5 л ПЭТ бутылки, которые сразу помещали в термосумку и в течение 6 ч доставляли в лабораторию.

2.2. Геофизические исследования методами электротомографии

Для работ методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) использована автономная многоэлектродная электроразведочная станция «СКАЛА 48». Предварительная обработка и инверсия данных ВЭЗ выполнялась с помощью программ SKILL TOOLS (ИНГГ СО РАН), ERT Lab и Surfer.

Работы методом ВЭЗ в модификации двумерной томографии выполнены по 21 профилю. Работы выполнялись в каменистом грунте. Первым этапом вся береговая линия была отработана 1-метровыми электроразведочными косами, т. е. расстояние между электродами 1 м, глубина сканирования 8–10 м. Общая длина установки 48 м. Вторым этапом после интерпретации данных, полученных с

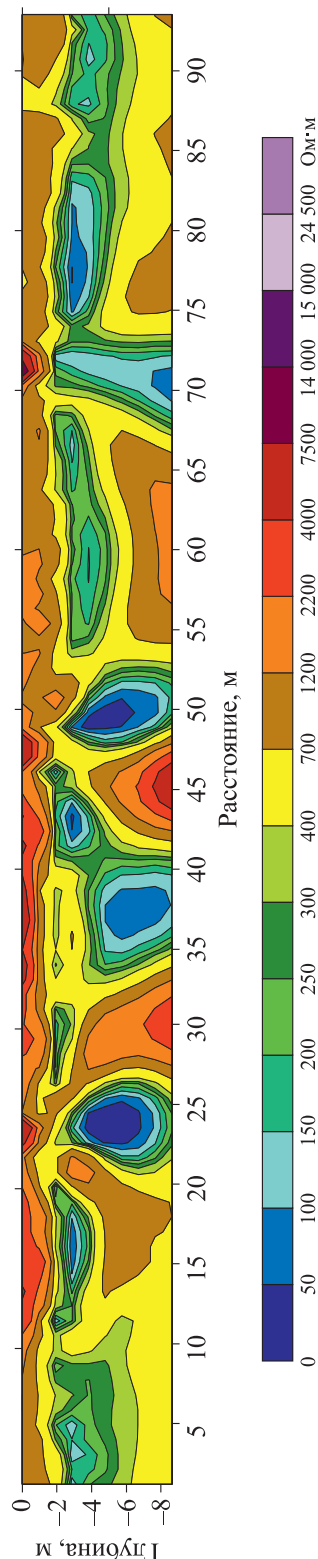


Рис. 3. Профиль № 3 (выполнен в 1,5–2 м от уреза).

На геоэлектрическом разрезе определены зоны низких сопротивлений на отметках по расстоянию 15 м (глубина 3 м), 25 м (гл. 3–8 м), 37 м (гл. 4–8 м), 42 м (гл. 3 м), 50 м (гл. 3–8 м), 70 м (гл. от 7 м и глубже), 75 м (гл. 3 м).

1-метровой установки, на профилях, где выявлены зоны низких сопротивлений, были сделаны повторные съемки 5-метровой установкой (расстояние между электродами 5 м, глубина работы 45–28 м). Пример выделения зон грунтовых вод приведен на рис. 3. Профиль № 3 выполнен в 1,5–2 м от уреза, расположен напротив домов по адресу ул. Суворова, 5Б.

2.3. Водолазное обследование

Рекогносцировочные водолазные исследования на трансектах донных биогеоценозов проводились с отбором микробиологических проб, проб воды для многоэлементного анализа, образцов проб бентосной флоры и фауны. Параллельно осуществлялась фотовидеосъемка дна, фиксировались координаты отбора проб, глубина и температура воды на дне и поверхности.

2.4. Многоэлементный ИСП–МС анализ

Содержание химических элементов в воде определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Подготовленные пробы измеряли на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce в ОЦКП «Ультрамикрoанализ» при Лимнологическом институте СО РАН по методике, описанной в [3].

Типичные ошибки измерения (коэффициент вариации RSD), в зависимости от концентрации химических элементов, находятся в следующих диапазонах: <0,001 мкг/дм³ — RSD>25 %; 0,001–0,1 мкг/дм³ — RSD 25–10 %; 0,1–1 мкг/дм³ — RSD 10–5 %; >1 мкг/дм³ — RSD 5 %.

2.5. Микробиологический анализ

Количество колиформных бактерий (ОКБ) оценивали методами мембранной фильтрации и десятикратных разведений [4]. Термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ) учитывали методом культивирования при температуре 44 °С осажденных на фильтрах образцов. Определение вида бактерий проводили по определителю бактерий Берджи [5].

Фекальные энтерококки определяли методом мембранной фильтрации с использованием питательного селективного агарa Slanetz and Bartley Medium (производство «Himedia» № M612) и Bile Esculine Azide Agar (производство «Himedia» № M493).

Гетеротрофные микроорганизмы учитывали на мясopептонном агаре (ГМФ-агар, производство «НИЦФ», г. Санкт-Петербург), рыбopептонном агаре (РПА/10) [6]. Культивирование вели при комнатной температуре 7 суток.

Для определения различий между двумя выборками данных использовался непараметрический критерий Манна–Уитни [7].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методом ИСП–МС было определено содержание 72 химических элементов в отобранных пробах. В данной работе мы рассмотрим только некоторые из них. Концентрации потенциально антропогенных для территории пос. Листвянка элементов (Na, Cl, P, S, Zn, Pb), типичные маркеры поверхностного (Ca) и подземного (Ba) стока, а также Mn как показатель окислительно-восстановительных условий среды показаны на рис. 4, 5.

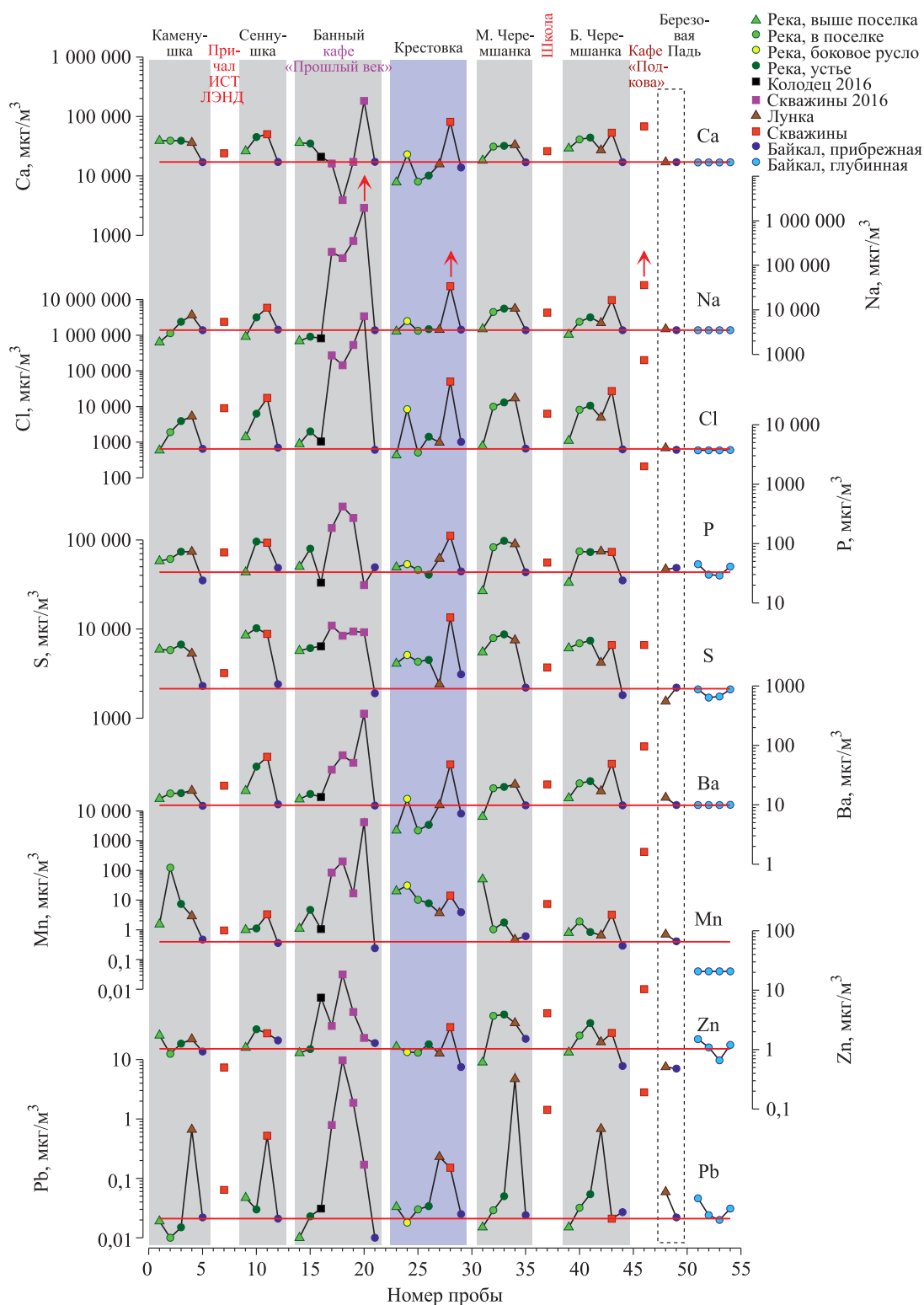


Рис. 4. Концентрация растворенных химических элементов в реках, лунках и скважинах береговой зоны оз. Байкал и его прибрежной акватории в районе пос. Листвянка по результатам ИСП–МС анализа.

Местоположения отобранных проб см. на рис. 2. Красная линия — среднее значение в прибрежной воде оз. Байкал.

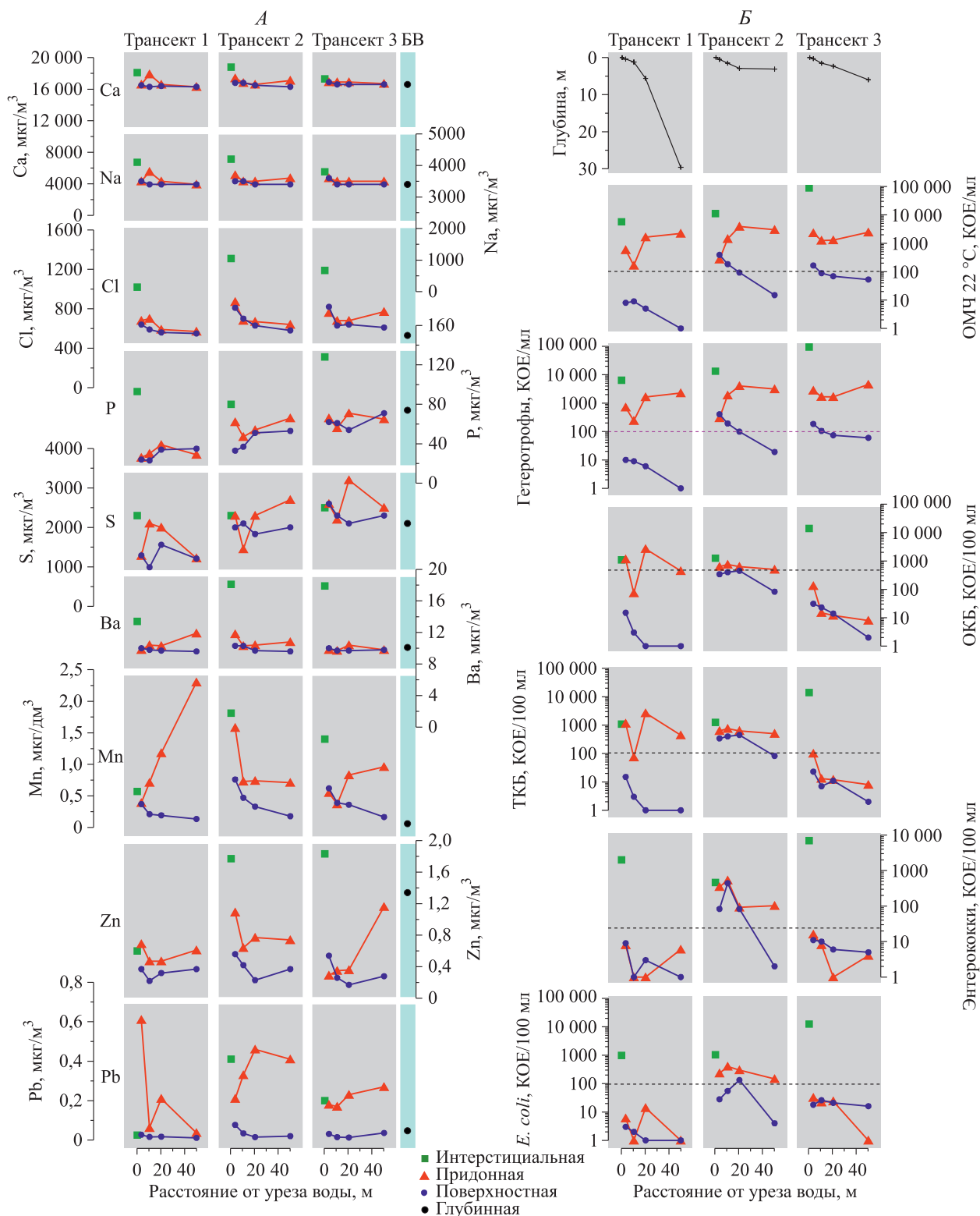


Рис. 5. Концентрация растворенных химических элементов (А) и микробиологических показателей (Б) в интерстициальной, придонной и поверхностной воде на трансектах.

БВ — глубинная вода Байкала. Местоположение проб на трансектах см. на рис. 2. Пунктирной линией показаны санитарно-гигиенические нормативы микробиологических показателей (см. текст).

Из данных на рис. 4 следует, что при прохождении через поселок вода рек в той или иной степени обогащается всеми элементами (за исключением Mn), что свидетельствует о влиянии пос. Листвянка на поверхностный сток. Наибольшее обогащение наблюдается по хлору — в среднем в 7 раз, по другим элементам в меньшей степени: P — 2,3, Na — 2,2, Zn и Ba — 2,0, Pb — 1,5, Ca — 1,3, S — 1,2 раза в среднем.

Ввиду большей водности р. Крестовка менее чувствительна к антропогенной нагрузке, которая обнаруживается только по хлору. Мал. Черемшанка и Бол. Черемшанка — самые плотно застроенные среди малых рек — испытывают наибольшее воздействие, которое проявляется по всем рассматриваемым элементам, кроме Mn. Последний — чувствительный маркер окислительно-восстановительной среды. Его повышенные концентрации указывают на наличие заболоченных участков в бассейне, в которых при пониженном содержании кислорода он мобилизуется из твердых фаз [8] и поступает в речной сток. При высоком окислительно-восстановительном потенциале (Eh) он легко окисляется, переходит в нерастворимую форму и мигрирует в составе взвеси [9, 10]. Поэтому можно видеть пиковые концентрации растворенного Mn на отдельных участках рек (Каменушка, Мал. Черемшанка), которые ниже по течению значительно уменьшаются (см. рис. 4). Пониженное содержание кислорода в подземных водах способствует его мобилизации, поэтому в относительно глубоких (2–4 м) свежепробуренных скважинах Mn обнаруживается в высоких концентрациях (до 4200 мкг/дм³ — напротив кафе «Прошлый век»; 420 мкг/дм³ — напротив кафе «Подкова», см. рис. 4).

Концентрация свинца в лунках и скважинах в большинстве случаев значительно больше, чем в реках (в 5 раз и более), что указывает на возможное антропогенное влияние поселка. Распределение цинка неравномерное, повышенные концентрации характерны для скважин напротив кафе «Прошлый век» и «Подкова». В этих же скважинах наблюдаются максимальные концентрации Na, Cl, P и Pb, что свидетельствует об интенсивном влиянии данных объектов на загрязнение грунтовых вод.

Сопоставляя концентрации элементов в устьях рек, лунках и скважинах с их концентрациями в прибрежной поверхностной воде Байкала, взятой напротив соответствующих объектов, можно видеть, что их влияние на расстоянии 10 м от берега не обнаруживается — оно нивелировано за счет большого разбавления, о чем свидетельствует близость составов прибрежной и глубинной воды озера (см. рис. 4). Из общего ряда выбивается точка напротив р. Крестовка по некоторым элементам (Cl, S, Mn) вследствие того, что находится в зоне смешения с интенсивным речным потоком.

Распределение *E. coli* в притоках оз. Байкал в районе пос. Листвянка (по данным от 30.10.2015 г.) показывает, что минимальное фекальное загрязнение характерно для р. Каменушка (0 КОЕ/100 мл в среднем течении реки и 30 КОЕ/100 мл в устье), т. е. на территории с централизованным отведением бытовых стоков антропогенное загрязнение незначительно. Реки Крестовка, Мал. Черемшанка и Бол. Черемшанка в среднем течении не испытывают сильной фекальной нагрузки (*E. coli* — 1, 45 и 22 КОЕ/100 мл соответственно). Пройдя через зону застройки гостиницами и кафе, устьевые участки рек интенсивно (на 1–2 порядка) загрязняются (*E. coli* — 473, 8300 и 480 КОЕ/100 мл соответственно).

Исследуя поверхностную и придонную воду на трансектах, мы хотели выяснить, оказывает ли влияние разгрузка загрязненных подземных вод на литоральную зону. Основываясь на вышеизложенных результатах, мы выбрали три места, которые характеризуются наиболее высокими параметрами химического и микробиологического загрязнения — прибрежная зона напротив кафе «Прошлый век», «Подкова» и пляж напротив школы. На рис. 5, А приведен набор химических элементов в сравнении с микробиологическими показателями (см. рис. 5, Б).

Из представленных данных видно, что концентрации главных элементов (Ca, Na) в придонной и поверхностной воде практически одинаковы и мало меняются вдоль профилей и между ними. Наблюдаются небольшие повышения концентраций этих элементов в придонной воде на первом трансекте в 10 м от берега, что, возможно, связано с близостью к месту подводной разгрузки высокоминерализованных грунтовых вод, от участка напротив кафе «Прошлый век», где концентрации этих элементов, а также Cl в пробуренных скважинах максимальные (см. рис. 4, усл. зн. 7). Так же как и Ca, Na, концентрация хлора в придонной воде на первом трансекте в 10 м от берега немного повышена.

В отличие от Ca и Na, хлор — более «чувствительный» индикатор антропогенного загрязнения, и он имеет некоторые особенности распределения. Чувствительность этого индикатора обусловлена тем, что его концентрация в подземной воде (в исследованных скважинах) в среднем в 870 раз выше, чем в байкальской, что на порядок больше аналогичных отношений по Na. То есть разбавление подземных стоков байкальской водой Cl будет отслеживать лучше. Его концентрация повышена в прибрежной воде (3 м) и уменьшается с увеличением расстояния от берега (см. рис. 5, А). Это ярко вы-

ражено на более мелководных трансектах 2 и 3 (профили глубины см. на рис. 5, Б). Исключение составляют небольшие повышения концентраций Cl в придонной воде — в 10 м от берега на первом трансекте и 50 м от берега на третьем. Возможно, что подземный сток напротив кафе «Подкова» разгружается на большем расстоянии от берега, в пользу этого также свидетельствуют профили Zn и Pb (см. рис. 5, А).

Концентрации фосфора в придонной и поверхностной воде на глубинных разрезах мало различаются (см. рис. 5, А). Имеется тенденция увеличения их концентраций с расстоянием от берега и в направлении большего скопления туристических объектов (от трансекта 1 к 3). Возможно, фосфор как биогенный элемент интенсивнее поглощается биотой в прибрежной зоне, в более удаленных и глубоководных зонах могут происходить процессы деструкции органического вещества и его частичная минерализация. Сера имеет те же тенденции, что и фосфор, однако ее интерпретация затруднена ввиду больших ошибок измерения методом ИСП–МС при относительно низких «байкальских» концентрациях.

Барий как потенциальный индикатор подземного стока прослеживается плохо, вероятно, из-за его относительно невысокого содержания по сравнению с байкальской водой (в скважинах в среднем в 8 раз больше, чем в воде озера). Его сигнал наиболее четко прослеживается в придонной воде на первом трансекте — увеличивается с расстоянием от берега и глубиной, указывая на то, что в 50 м от берега происходит разгрузка другого типа подземных вод, отличных от тех, что вскрываются 4-метровыми скважинами напротив кафе «Прошлый век», поскольку рост концентрации Ba не сопровождается увеличением концентраций Na и Cl.

Наличие субквальной разгрузки подземных бескислородных вод хорошо маркируется Mn на профилях придонной воды. Особенно отчетливо это видно на первом трансекте, где тренд Mn совпадает с трендом Ba. В целом концентрация Mn возрастает в придонной воде с увеличением расстояния от берега и с глубиной (за исключением прибрежной воды на трансекте 2), а в поверхностной, наоборот, уменьшается.

Концентрация Zn и Pb в большинстве случаев в придонной воде заметно выше, чем в поверхностной, что указывает на подток подземных вод и(или) процессы экстракции на границе раздела вода–дно.

В целом полученная картина распределения по химическим элементам показывает, что происходит эффективное разбавление подземных стоков в литоральной зоне. Тем не менее влияние загрязненных подземных стоков по отдельным чувствительным элементам (Cl, Mn, Ba, Zn и Pb) прослеживается.

На рис. 5, Б отражены основные микробиологические показатели воды в акватории пос. Листвянка и их санитарно-гигиенические нормативы.

Общее микробное число (ОМЧ) при 22 °С должно быть не более 100 КОЕ/мл по нормативам для качества расфасованных вод (СанПиН 2.1.4.1116-02, Россия); энтерококки — не более 35 КОЕ/100 мл (United States Environmental Protection Agency (2011, November 30). Ambient Water Quality Criteria for Bacteria. Retrieved December 11, 2013 — норматив для США); общие колиформные бактерии (ОКБ) — не более 500 КОЕ/100 мл для воды, используемой для рекреационных целей (СанПиН 2.1.5.980-00, Россия); термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ) — не более 100 КОЕ/100 мл для воды, используемой для рекреационных целей (СанПиН 2.1.5.980-00, Россия); термотолерантная *E. coli* — не более 250 КОЕ/100 мл (The Council of the European Union. DIRECTIVE 2006/7/EC of the European Parliament and of the Council of February 15, 2006 concerning the management of bathing water quality and repealing Directive 76/160/EEC, 2006/7/EC. Off J Eur Union. 2006; 64:37–51 — норматив для Европы); не более 126 КОЕ/100 мл (United States Environmental Protection Agency (2011, November 30). Ambient Water Quality Criteria for Bacteria. Retrieved December 11, 2013 — норматив для США).

Из рис. 5, Б следует, что количество ТКБ на трансекте 3 в придонной и поверхностной воде соответствует нормативам, предусмотренным в России для воды, используемой для рекреационных целей. На трансекте 2 количество ТКБ в придонной и поверхностной воде выходит за пределы допустимых значений, причем в придонной воде значения ТКБ стабильно выше. Это различие еще больше проявлено на трансекте 1, где три образца придонной воды из четырех не соответствовали нормам, за исключением точки на расстоянии 10 м от берега. Образцы же поверхностной воды соответствовали нормативам. Различие между поверхностной и придонной водой достигает трех порядков.

Распределение ОКБ похоже на ТКБ, за исключением того, что на трансекте 2 показатели обоих типов вод близки к предельным значениям нормативов, а в первых трех точках в придонной воде нормативы немного превышены.

Количество энтерококков на трансектах 1 и 3 в придонной и поверхностной воде соответствует нормативам, предусмотренным в США (в России этот показатель не нормируется). На трансекте 2 их количество как в придонной, так и в поверхностной воде выходит за пределы допустимых значений, за исключением поверхностной воды в 50 м от берега.

Распределение термотолерантной *E. coli* похоже на распределение энтерококков — на трансектах 1 и 3 придонная и поверхностная вода соответствует нормативам, предусмотренным в США. На трансекте 2 нормативы нарушены в придонной воде и одной точке в поверхностной воде на расстоянии 20 м от берега. Здесь систематически наблюдаются более высокие показатели для придонной воды по сравнению с поверхностной.

Высокую микробиологическую обсемененность разгружающихся субаквальных подземных вод наиболее ярко демонстрируют показатели ОМЧ и гетеротрофов в придонной воде (см. рис. 5, Б). Их значения для придонных и поверхностных вод сильно различаются (на 1–3 порядка). Все придонные воды превышают установленные нормативы от 2 до 400 раз. Распределение вдоль трансектов имеет неравномерный характер и разнонаправленную тенденцию изменения с глубиной и расстоянием от берега — увеличение показателей для придонной воды и уменьшение для поверхностной.

Таким образом, из трех исследованных трансектов именно второй, находящийся в центре туристической зоны в пос. Листвянка, отличается повышенной концентрацией санитарно-показательных бактерий в поверхностной и придонной воде озера, что связано с большой антропогенной нагрузкой, в том числе с увеличивающимся год от года потоком туристов [11], ростом количества новых гостиниц, открытием и функционированием многочисленных кафе и отсутствием очистки фекальных вод, просачивающихся через грунт и выходящих в прибрежную зону озера. Хотя не существует норматива по санитарно-показательным микроорганизмам, обнаруженным в интерстициальных водах, по нашим данным можно судить о загрязнении прибрежных пляжей и грунтов, поскольку количество бактерий, обнаруженных в этих водах, было от 1000 КОЕ/100 мл и в некоторых случаях достигало 14 000 КОЕ/100 мл, что сравнимо с неочищенными сточными водами. На примере трансекта 2 становится очевидным, что придонная вода обсеменена санитарно-показательными микроорганизмами (заметно превышающими имеющиеся нормативы), поступающими с субаквальными разгрузками на дно озера через грунт. Там эти микроорганизмы могут прикрепляться к различным водорослям, камням и другим объектам, защищаясь от губительного для них УФ-излучения (солнечный свет) и сохраняя свою жизнеспособность, а, возможно, и размножаться при определенных условиях (высокая температура воды). В период отбора проб температура воды на глубинах до 6 м составляла 16–18 °С.

Химические элементы, свидетельствующие об антропогенном загрязнении, сильно разбавляются в байкальской воде, и по их концентрации становится трудно определить влияние человека на экосистему. Таким образом, биологический компонент антропогенного влияния приобретает здесь первостепенное значение по сравнению с химическим компонентом.

Аллохтонная микрофлора, не типичная для самого Байкала, систематически или непрерывно попадая в озеро в зонах субаквальной разгрузки фекальных вод, могла нарушить один или несколько литофильных компонентов экосистемы прибрежной зоны Байкала, повлиять на численность микромицетов, накипных и листоватых лишайников, обрастающих камни, сверху которых уже поселяются различные типы губок и водорослей. Микробиологическое загрязнение могло стать причиной устранения отдельных симбионтных компонентов губок. При сокращении численности одного (лишайники) или нескольких звеньев (накипные лишайники, эндемичные нитчатые водоросли, литофильные бактерии и микроорганизмы) в экосистеме могла освободиться ниша, и эту нишу могла занять нитчатая водоросль спирогира, вполне способная развиваться и без помощи лишайников и микромицетов. Если учесть тот факт, что в районе пос. Листвянка постоянно идет антропогенный подток биогенных элементов, в том числе азота и фосфора, из-за слива антропогенных фекальных вод, помывочных вод с душа, от стирки белья, постоянно происходящих во множестве отелей, расположенных на берегу озера, а температура воды в летнее время достигает 18 °С, то массовое развитие водорослей рода *Spirogyra* вполне закономерно и объяснимо.

Аналогично микробиологическими, а не химическими причинами может быть вызвана деградация губок.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пос. Листвянка на берегу Байкала нет промышленных объектов. Основная нагрузка на окружающую среду и оз. Байкал связана с потоком туристов. Ежедневно на территорию поселка въезжает свыше 12 тыс. человек.

Проведенные комплексные исследования территории и акватории пос. Листвянка (оз. Байкал) показали, что химическое и микробиологическое загрязнение поверхностных и подземных вод, интенсификация подземных миграционных потоков связаны с ростом в период 2010–2016 гг. числа гостиниц и кафе. Все они обустроены современными туалетами, душевыми и ванными. Централизованной системы канализования в пос. Листвянка нет, поэтому основная масса стоков попадает в реки и подземные горизонты. Почвогрунты поселка малогумусные и не содержат глинистой фракции, поэтому не являются биогеохимическими барьерами.

Геофизические исследования выявили на берегу Байкала на глубине 2–8 м большое количество зон подземного стока. Пробуренные в аномальных зонах скважины показали интенсивное химическое и микробиологическое загрязнение подземных вод.

Все реки, кроме р. Крестовка, при прохождении через территорию поселка насыщаются многими из рассмотренных химических элементов (Na, Cl, P, Ba, Pb) и загрязняются фекальными микроорганизмами.

Опробование акватории поселка показало, что поверхностная вода озера не испытывает сильного влияния антропогенно загрязненных стоков. Санитарно-гигиенические характеристики воды поверхностного слоя в полосе 0–50 м от берега соответствуют нормативам, за исключением некоторых микробиологических показателей на прибрежных участках, близко расположенных к местам, интенсивно посещаемым туристами (трансект 2). Содержание микробов в воде по мере удаления от берега снижается.

Для донных микробиоценозов устанавливается иная картина. По всем параметрам, особенно по ОМЧ и гетеротрофам, заметна существенная разница на дне и в поверхностном слое. Различия достигают трех порядков. Насыщенность фекальными формами бактерий (*E. coli*, энтерококки, ТКБ, ОКБ) придонной воды в большинстве случаев выше, чем в поверхностной. Распределение санитарно-гигиенических показателей неравномерное, наблюдается некоторая тенденция к увеличению микробной обсемененности по направлению к крутому склону литоральной зоны, что, вероятно, обусловлено наличием сопутствующих благоприятных факторов — снижением прозрачности и содержания кислорода в воде. Бескислородная среда в зоне субаквальной разгрузки подтверждается повышенными концентрациями марганца.

Сохранение нетипичной для каменной литорали озера микробной флоры может быть связано также с повышенными температурами воды на глубинах до 6 м. В июле 2016 г. температура составляла 16–18 °С. Водолазное обследование показало, что поясное распространение фитобентоса нарушено, оно сменяется пятнистым развитием сообществ спирогиры и улотрикса. Вблизи крутого склона на расстоянии 20–50 м от берега проявляется зона губок, претерпевающих биологическую деструкцию. Мелководная зона литорали испытывает влияние большого количества прогулочных кораблей, сброс сточных вод от которых создает дополнительный стресс для бентосных организмов. Крутой склон литорали способствует преобладанию мутьевых потоков перед волноприбойной деятельностью, поэтому скопления спирогиры в заплесковой зоне пос. Листвянка не обнаруживаются. Все изменения бентоса сосредоточены в каньонах, местах проявления мутьевых потоков.

Таким образом, антропогенная нагрузка на территории пос. Листвянка, возросшая в последние пять лет, привела к субаквальной разгрузке в литоральной зоне химически и микробиологически загрязненных вод. К этим зонам приурочены участки развития нитчатых водорослей. По зонам каньонов прослеживаются нарушенные сообщества губок.

Работа выполнена в рамках Интеграционной программы ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 открытом Лиственничном заливе озера Байкал, как следствие локального антропогенного воздействия // Докл. РАН. — 2012. — Т. 447, № 2. — С. 227–229.
2. Грачев М. А. «Авоська и авось». Экологический кризис на Байкале: загадка века // Наука из первых рук. — 2016. — Т. 68, № 2. — С. 6–19.
3. Чебыкин Е. П., Сороковикова Л. М., Томберг И. В., Воднева Е. Н., Рассказов С. В., Ходжер Т. В., Грачев М. А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. — 2012. — Т. 20, № 5. — С. 613–631.

4. **Санитарно-микробиологический** и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов: Методические указания. МУК 4.2.1884-04. — М., 2004. — 62 с.
5. **Определитель** бактерий «Берджи» / Под ред. Дж. Хоулт. — М.: Мир, 1997. — Т. 1. — 492 с.
6. **Горбенко Ю. А.** О наиболее благоприятном количестве сухого питательного агара в средах для культивирования морских микроорганизмов // Микробиология. — 1961. — Т. 30, № 1. — С. 168–172.
7. **Гланц С.** Медико-биологическая статистика. — М.: Практика, 1999. — 462 с.
8. **Bjorkvald L., Buffam I., Laudon H., Morth C.-M.** Hydrogeochemistry of Fe and Mn in small boreal streams: the role of seasonality, landscape type and scale // Geochim. Cosmochim. Acta. — 2008. — Vol. 72. — P. 2789–2804.
9. **Pokrovsky O. S., Schott J., Dupre B.** Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia // Geochim. Cosmochim. Acta. — 2006. — Vol. 70. — P. 3239–3260.
10. **Pokrovsky O. S., Schott J., Kudryavtzev D. I., Dupre B.** Basalt weathering in Central Siberia under permafrost conditions // Geochim. Cosmochim. Acta. — 2005. — Vol. 69. — P. 5659–5680.
11. **Kobanova G. I., Takhteev V. V., Rusanovskaya O. O., Timofeyev M. A.** Lake Baikal ecosystem faces the threat of eutrophication // Intern. Journ. Ecology. — 2016. — Vol. 2016, Article ID 6058082, 7 p. — <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6058082>

Поступила в редакцию 24 октября 2016 г.
