УДК: 574.587.550.47 DOI: 10.15372/GIPR20210209

**Н.Н. КУЛИКОВА, Е.П. ЧЕБЫКИН, Е.А. ВОЛКОВА, Н.А. БОНДАРЕНКО, Н.А. ЖУЧЕНКО, О.А. ТИМОШКИН, А.Н. СУТУРИН**

Лимнологический институт СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, kulikova@lin.irk.ru, cheb@lin.irk.ru, cathvolkova@mail.ru, nina@lin.irk.ru, zhna@lin.irk.ru, timole.turgenevo@gmail.com, san@lin.irk.ru

# ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВОДОРОСЛЕЙ РОДА *SPIROGYRA* КАК ИНДИКАТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ БАЙКАЛА ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫМИ СТОКАМИ

*Методом ИСП-МС определен элементный состав прибрежных вод оз. Байкал, водорослей рода Spirogyra, широко распространившихся в последние годы в мелководной зоне, сопряженной с населенными пунктами и рекреациями, а также бентосных водорослей, доминирующих на участках литорали с низким уровнем антропогенного воздействия. В интерстициальной воде зоны заплеска, граничащей с территориями населенных пунктов и рекреаций, обнаружено повышенное по сравнению с интерстициальной водой фоновых участков содержание Na, Mg, S, Si, P, K, Cl, Mn, Co, Ba. Наиболее высокие концентрации этих же элементов (Na > Ca, K, S > Mg, Ba, P > Cl, Mn) установлены и в составе спирогиры, собранной на участках, сопряженных с населенными пунктами. Особенность элементного состава водорослей рода Spirogyra, растущих в мелководной зоне озера, — широкий диапазон концентраций Na, Cl, K, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Br и очень высокое содержание Ba. Спирогира значительно превосходит байкальские бентосные водоросли по содержанию Li, Na, Mn, Co, Ba и мало отличается по содержанию Mg, P, S, Cl, K, Ca. Указанные изменения в элементном составе воды и не характерная для байкальских видов водорослей высокая степень концентрации Na, Cl, Mn, Co, Ba в составе спирогиры говорят о возросшем притоке с бытовыми сточными водами в прибрежную зону озера растворенных соединений Na, Mg, S, Si, P, K, Cl, Mn, Co, Ba.*

**Ключевые слова:** *загрязненные сточные воды, прибрежная зона, зона заплеска, литораль, бентосные водоросли.*

**N.N. KULIKOVA, E.P. CHEBYKIN, E.A. VOLKOVA, N.A. BONDARENKO, N.A. ZHUCHENKO, O.A. TIMOSHKIN, A.N. SUTURIN**

Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, kulikova@lin.irk.ru, cheb@lin.irk.ru, cathvolkova@mail.ru, nina@lin.irk.ru, zhna@lin.irk.ru, timole.turgenevo@gmail.com, san@lin.irk.ru

# ELEMENTAL COMPOSITION OF ALGAE OF THE GENUS *SPIROGYRA* AS THE INDICATOR OF POLLUTION OF THE BAIKAL NEAR-SHORE ZONE WITH DOMESTIC SEWAGE

*Using the ICP-MS method we determined the elemental composition of near-shore waters of Lake Baikal and algae of the genus Spirogyra which have become of widespread occurrence in recent years in a shallow water zone adjacent to settlements and recreation sites, as well as of benthic algae dominating at littoral sites with a low level of anthropogenic impact. In the interstitional water of the overwash zone at the boundary the territories of settlements and recreations territories, elevated contents of Na, Mg, S, Si, P, K, Cl, Mn, Co and Ba were observed as compared to the water of background areas. The highest contents of the same elements: Na > Ca, K, S > Mg, Ba, P > Cl and Mn were also recorded in Spirogyra collected at the sites adjacent to settlements. A special feature in the elemental composition of algae of the genus Spirogyra growing in the lake's shallow-water zone is a wide range of concentrations of Na, Cl, K, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Br and Ba as well as a very high content of Ba. Spirogyra spp. considerably surpasses the Baikalian benthic algae in the contents of Li, Na, Mn, Co and Ba and differs little in the contents of Mg, P, S, Cl, K and Ca. The aforementioned changes in the elemental composition of water and a high degree of concentration of Na, Cl, Mn, Co and Ba in Spirogyra uncharacteristic for the Baikalian species of algae suggest an increased input of dissolved compounds of Na, Mg, S, Si, P, K, Cl, Mn, Co and Ba with domestic sewage into the near-shore zone of the lake.*

**Keywords:** *polluted wastewaters, near-shore zone, overwash zone, littoral, benthic algae.*

**© 2021 Куликова Н.Н., Чебыкин Е.П., Волкова Е.А., Бондаренко Н.А., Жученко Н.А., Тимошкин О.А., Сутурин А.Н.**

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Нехарактерное для оз. Байкал широкое распространение водорослей рода *Spirogyra* и масштабное нарушение зонального распределения бентосных водорослей обнаружено в 2011 г. в литорали залива Лиственничного в пределах пос. Листвянка [1]. Комплексные исследования, проведенные на территории поселка и в заливе Лиственничном, показали, что поверхностные и подземные воды, поступающие в залив, загрязнены фекальными микроорганизмами и обогащены растворенными соединениями Na, Cl, K, P, Zn, Ba, Pb [2].

С 2013 г. развитие спирогиры наблюдалось практически вдоль всего побережья [3], а наибольшая ее биомасса отмечена на участках, сопряженных с территориями населенных пунктов [4], сбрасывающих в пределах водосбора озера загрязненные хозяйственно-бытовые стоки [5].

В смешанных бытовых сточных водах (хозяйственных и фекальных) главным источником азота (80–90 %), калия (90 %), а также фосфора (более 50 %) является моча [6]. В норме взрослый человек за сутки выделяет 1–2 л мочи. В ее суточном количестве содержится 8–15 г хлорида натрия, 3–6 г ионов натрия и 1,5–3,2 г калия, 3,6–9,0 г ионов хлора, 0,9–1,3 г фосфора неорганического, 10–18 г общего азота, содержание ионов кальция — 0,1–0,25 г, магния — 0,1–0,2 г, общее содержание сульфатов в расчете на серу примерно 1,8 г. Безазотистые органические вещества мочи массой около 1 г представлены щавелевой, лимонной, масляной и другими кислотами [7]. По расчетам, приведенным в работе [8], за сутки от 250 человек в хозяйственно-бытовую зону Иваньковского водохранилища поступает 2500–3750 г хлора, 250–1250 г оксида фосфора (V), 125–250 г аммиака, 50–150 г мочевой кислоты, 6250—8750 г мочевины. Аналитические исследования почвенных образцов данной территории подтвердили эти расчеты. В рекреационный период отмечено увеличение в верхних горизонтах почв: хлоридов — в 5–15, натрия — в 3–7 раз, минеральных соединений азота и фосфора — в 2–3 раза.

Число зарегистрированных туристов, посетивших Байкал в 2016 и 2017 гг., составило 2,6 и 2,7 млн чел. соответственно [9]. Это примерно в 5–9 раз больше, чем в 1990 и 2004 гг. (300–500 тыс. чел.) [10]. В 2017 г. в бассейн оз. Байкал было сброшено 2,27 млн м$^3$ сточных вод. Общая масса загрязняющих веществ в них составила 447,6 т (в 2016 г. — 362,5 т, в 2015 г. — 360,9 т). В составе загрязняющих веществ содержалось: 0,12 т нефтепродуктов, 134,7 т сульфат-анионов, 136,4 т хлорид-анионов, 74,4 т нитрат-анионов, фосфатов — 9,56 т, СПАВ — 0,31 т, азота аммонийного — 30,3 т [9].

В большинстве населенных пунктов Прибайкалья канализационные сети отсутствуют или охватывают только часть поселения. Хозяйственно-бытовые отходы концентрируются в канавах, свалках, выгребных ямах с неполной гидроизоляцией или вовсе без нее. При этом в летний сезон в населенных пунктах, расположенных вблизи побережья, соотношение местного населения и отдыхающих изменяется в диапазоне от 1:5 до 1:10 [11]. Традиционные зоны неорганизованного отдыха в летние месяцы заселяются туристами и автотуристами. В соответствии с плотностью их размещения возрастают загрязнение и степень деградации растительного и почвенного покрова [12], пляжных грунтов, загрязнение поверхностных, внутрипочвенных и грунтовых вод, увеличивается сток в прибрежную зону жидких хозяйственных отходов и продуктов жизнедеятельности человека. Загрязненные стоки береговой зоны дополняются сбросом подсланевых и хозяйственно-бытовых вод с курсирующих по Байкалу судов [9].

Таким образом, в потоки органических и минеральных соединений, поступающих в прибрежную зону с природными поверхностными и грунтовыми водами с водосборной площади озера, ежегодно, кроме промышленных стоков, вливаются нарастающие объемы загрязняющих веществ бытовых сточных вод населенных пунктов, зон рекреации, традиционных мест массового отдыха неорганизованных туристов. Практически неконтролируемый источник загрязняющих веществ — масса разлагающихся навалов твердых отходов потребления, а также дождевые, ливневые, снеговые и грунтовые стоки с вышеперечисленных территорий.

Загрязняющие вещества, попадающие в прибрежную зону Байкала, транспортируются круглогодичными вдольбереговыми циркуляционными течениями, рассеиваются в озере диффузионными процессами, вовлекаются в процессы вертикального водообмена и конвективного перемешивания [13]. В период летней гомотермии, когда течение нередко «прижато» к берегу, загрязненные стоки разбавляются в меньшей степени и обеспечивают устойчивое загрязнение литоральной зоны [14]. Часть загрязняющих веществ осаждается и накапливается в донных отложениях или концентрируется в массе растительных поясов литорали, сформированных определенными видами бентосных водорослей (*Ulothrix zonata* — на глубине 0–1,5 м, *Tetraspora cylindrica*, *Didymosphenia geminata* — от 1,5 до 2,5 м, эндемичными видами рода *Draparnaldioides* — от 2,5 до 10 м) [15].

Из приведенных данных следует, что с хозяйственно-бытовыми, загрязненными поверхностными и грунтовыми стоками в прибрежную зону озера направлен наиболее мощный поток растворенных соединений азота, хлора, натрия, калия, серы. В меньшей степени загрязненные стоки обогащены растворенными соединениями фосфора, кальция, магния. В течение года значительная доля фосфора усваивается гидробионтами или в форме фосфата железа и гидратов его оксидов осаждается и аккумулируется в донных отложениях, таким образом, исключается из общего круговорота в толще воды. Компоненты ионного состава, напротив, накапливаются в толще воды в растворенном состоянии [16]. Из них наибольшей миграционной способностью отличаются хлорид-анионы и катионы натрия [17]. По прогнозу К.К. Вотинцева [16], дополнительное накопление растворенных соединений в водах озера, возникшее в последние 150–200 лет из-за хозяйственной деятельности человека, приведет к увеличению минерализации воды прибрежной зоны, а следовательно, к изменению ее качества.

Непосредственное содержание элементов в воде подвержено значительным колебаниям и не отражает реальный состав прибрежных вод [18]. Максимум информации о загрязнении водной среды дает элементный состав бентосных водорослей [19]. Особая эффективность использования водорослей рода *Spirogyra* в качестве биоиндикатора заключается в их способности концентрировать многие элементы (Na, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Cd, Pb) пропорционально росту их содержания в водной среде [19, 20].

Цель данной работы — оценка загрязнения вод прибрежной зоны по содержанию химических элементов в водорослях рода *Spirogyra*; анализ особенности накопления макро- и микроэлементов водорослями рода *Spirogyra* и бентосными водорослями, доминирующими в растительных поясах незагрязненных участков литорали Байкала.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Пробы воды отбирали в июне 2012, 2013, 2016, 2017, 2018 гг. на участках прибрежной зоны, сопряженных с территориями рекреаций и населенных пунктов, и на участках, не подверженных интенсивному антропогенному воздействию (фоновых). Образцы водорослей отбирали в июне и сентябре 2014, 2016, 2017, 2018 гг. (рис. 1).

Воду мелководной зоны отбирали пластиковыми шприцами в 1 м от уреза; интерстициальную воду (смесь пропитывающей и насыщающей пляжные грунты озерной воды и стекающей с береговой зоны поверхностной и грунтовой воды), — в 1 м выше уреза, на пляжах зоны заплеска из лунок глубиной 30–40 см. Пробы воды фильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм в полипропиленовые пробирки. В качестве консерванта использовали дважды очищенную суббойлинговой перегонкой 70 % азотную кислоту. Образцы водорослей промывали в прибрежной и байкальской фильтрованной воде. Отмытые водоросли просматривали под бинокуляром МБС-10 для удаления остатков загрязнений, ополаскивали дистиллированной водой и доводили до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при 60 °С, до постоянной массы — при 105 °С. Подготовку проб водорослей к анализу выполняли способом кислотной минерализации (70 % $HNO_3$, 30 % $H_2O_2$) [21]. Из образцов грунта, отобранных со дна лунок на пляжах, ситовым методом выделяли гранулометрическую фракцию <0,25 мм и методом квартования составляли средние пробы. Усредненные пробы сушили при 105 °С до постоянного веса и использовали для ацетатно-аммонийных вытяжек ($CH_3COONH_4$, pH 7,0) легкоподвижных соединений макро- и микроэлементов [22].

Элементный состав всех проб определяли методом ИСП-МС. Анализ выполняли на масс-спектрометре Agilent 7500ce фирмы Agilent Technologies с квадрупольным масс-анализатором в Центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» при Лимнологическом институте СО РАН. Правильность определений оценивали, используя аттестованные стандартные образцы состава элодеи канадской (ЭК-1) (Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН), стандартный образец состава глубинной байкальской воды [23]. Типичные ошибки измерения (коэффициент вариации RSD), в зависимости от концентрации химических элементов, находились в следующих диапазонах: <0,001–RSD > 25; 0,001–0,1–RSD 25–10; 0,1–1–RSD 10–5; >1 мкг/л – RSD 5 %. Концентрационную функцию водорослей оценивали относительно элементного состава воды: $K = C_1/C_2$, где $K$ — коэффициент биологического накопления, $C_1$ — концентрация элемента в сырой биомассе водорослей; $C_2$ — то же, в воде. Содержание воды в талломах водорослей определяли термовесовым методом.

Статистическая обработка данных проведена в программах MS Excel 2007 и Statistica 7. Результаты представлены в виде средних значений и стандартных отклонений. Оценка достоверности различий между средними проведена по U-критерию Манна–Уитни при уровне статистической значимости ≤0,05.

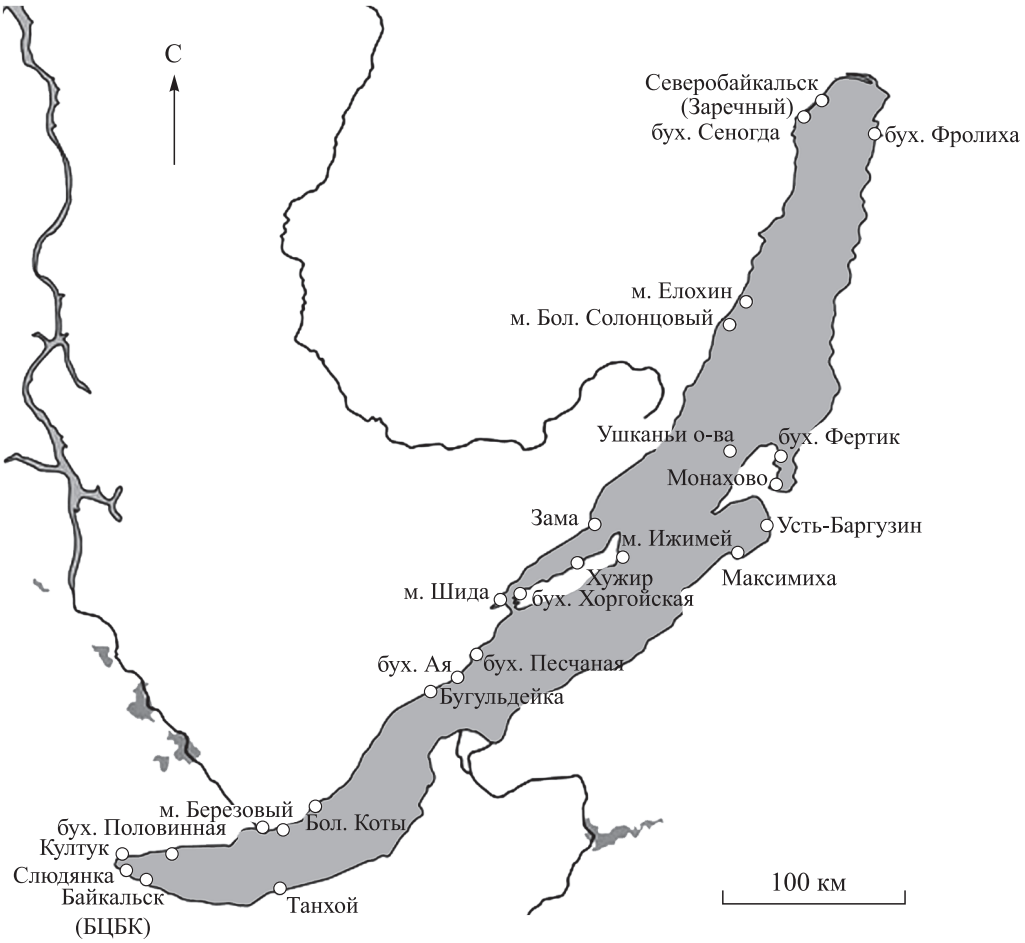


*Рис. 1.* Схема расположения точек отбора проб воды и бентосных водорослей прибрежной зоны оз. Байкал.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пробы воды отбирались в июне 2012, 2013, 2016–2018 гг. на участках литоральной зоны — фоновых (число проб $n = 37$) и сопряженных с территориями небольших населенных пунктов и рекреаций ($n = 25$) и крупных поселков ($n = 8$). К фоновым относятся следующие участки: падь Варначка (бухта Большие Коты); севернее пос. Бугульдейки; бухта Хоргойская (о. Ольхон); мыс Ижимей (о. Ольхон); Большой Ушканий остров; мыс Большой Солонцовый; севернее мыса Солонцового; бухта Фертик (Чивыркуйский залив). Небольшие населенные пункты и рекреации — стационар ЛИН СО РАН (пос. Большие Коты); бухта Ая; мыс Шида (пролив Малое Море); пос. Максимиха, турбаза (Баргузинский залив); пос. Монахово (Чивыркуйский залив). Крупные поселки (с населением >1000 чел.) — Листвянка, Култук, Хужир, Заречный (пригород Северо-Байкальска), Усть-Баргузин.

Несмотря на значительно возросшее поступление в прибрежную зону озера Na, K, Cl, S, P, Ca, Mg [6, 7, 9, 17] с загрязненными сточными водами, в элементном составе проб воды фоновых участков литорали и участков, сопряженных с территориями небольших населенных пунктов и рекреаций, значимых различий не установлено. Увеличение содержания Cl в 1,5–2 и Mn — в 3–4 раза обнаружено в пробах воды участков, сопряженных с крупными населенными пунктами (табл. 1).

Как уже отмечалось, загрязняющие вещества, попадая в прибрежную зону, разбавляются при движении и перемешивании водных масс, переносятся течениями и гидробионтами, концентрируются в донных отложениях или мигрируют в виде взвесей, поглощаются растительными и животными организмами. В результате высокое содержание растворенных соединений многих химических элементов в загрязненных поверхностных и подземных стоках в воде мелководной зоны озера в большинстве случаев снижается до фонового уровня и мало отличается от состава стандартного образца глубинной байкальской воды.

Таблица 1

**Среднее содержание (± стандартное отклонение) химических элементов в воде литоральной зоны, в 1 м от уреза, мкг/л**

| Элемент | Участки литоральной зоны | | | Глубинная байкальская вода** |
|---|---|---|---|---|
| | фоновые ($n$ = 37) | сопряженные с территориями населенных пунктов и рекреаций | | |
| | | небольшие поселки и турбазы ($n$ = 25) | крупные поселки ($n$ = 8) | |
| Li | 1,96 ± 0,35 | 1,81 ± 0,27 | 1,89 ± 0,20 | – |
| Na | 3200 ± 450 | 3200 ± 550 | 3600 ± 600 | 3260 ± 210 |
| Mg | 2900 ± 500 | 3000 ± 750 | 3000 ± 250 | 2560 ± 170 |
| Si | 630 ± 140 | 620 ± 140 | 800 ± 260 | – |
| P | 50,7 ± 17,7 | 59,0 ± 16,0 | 59,0 ± 11,4 | – |
| S | 2200 ± 690 | 2300 ± 800 | 3000 ± 1000 | 1840 ± 110 |
| Cl | 540 ± 110 | 610 ± 110 | 1180 ± 230* | – |
| K | 880 ± 190 | 920 ± 140 | 1100 ± 240 | 1020 ± 60 |
| Ca | 15 900 ± 2900 | 15 000 ± 1900 | 16 500 ± 900 | 15 700 ± 1000 |
| Ti | 0,26 ± 0,10 | 0,36 ± 0,18 | 0,39 ± 0,16 | – |
| V | 0,37 ± 0,12 | 0,40 ± 0,11 | 0,50 ± 0,20 | – |
| Cr | 0,17 ± 0,09 | 0,18 ± 0,09 | 0,16 ± 0,08 | – |
| Mn | 0,96 ± 0,49 | 1,60 ± 0,42 | 4,52 ± 2,85* | 0,44 ± 0,04 |
| Co | 0,042 ± 0,014 | 0,052 ± 0,018 | 0,062 ± 0,029 | – |
| Ni | 0,43 ± 0,17 | 0,42 ± 0,16 | 0,57 ± 0,11 | 0,31 ± 0,14 |
| Cu | 1,17 ± 0,35 | 0,96 ± 0,56 | 1,03 ± 0,50 | 0,87 ± 0,20 |
| Zn | 1,05 ± 0,35 | 0,98 ± 0,38 | 0,99 ± 0,41 | 1,94 ± 0,20 |
| As | 0,36 ± 0,09 | 0,34 ± 0,09 | 0,33 ± 0,06 | 0,33±0,06 |
| Se | 0,13 ± 0,08 | 0,10 ± 0,05 | 0,14 ± 0,06 | – |
| Br | 8,96 ± 2,88 | 8,51 ± 1,35 | 9,67 ± 1,15 | – |
| Rb | 0,56 ± 0,17 | 0,53 ± 0,08 | 0,62 ± 0,06 | – |
| Sr | 100 ± 20 | 100 ± 10 | 103 ± 10 | – |
| Mo | 1,25 ± 0,05 | 1,26 ± 0,05 | 1,23 ± 0,06 | – |
| Cd | 0,0056 ± 0,0024 | 0,0057 ± 0,0027 | 0,0063 ± 0,0030 | 0,010 ± 0,006 |
| I | 2,42 ± 0,26 | 2,42 ± 0,20 | 2,48 ± 0,30 | – |
| Ba | 10,0 ± 1,0 | 12,7 ± 5,2 | 13,7 ± 3,2 | 10,8 ± 6,6 |
| W | 0,034 ± 0,012 | 0,038 ± 0,021 | 0,053 ± 0,021 | – |
| Pb | 0,060 ± 0,016 | 0,071 ± 0,010 | 0,080 ± 0,028 | 0,064 ± 0,05 |

Примечание. Здесь и в табл 2, 3: $n$ – число проб, прочерк – нет данных.

* Значимые различия по сравнению с содержанием химических элементов в воде фоновых участков ($U_{Cl}$ = 0, $U_{tabl}$ = 77; $U_{Mn}$ = 14, $U_{tabl}$ = 68, $p \le 0,05$).

** Элементный состав стандартного образца глубинной байкальской воды, отобранной на глубине 500 м в заливе Лиственничном (западное побережье Южного Байкала) [23].

Поступление избытка многих химических элементов с загрязненными поверхностными и грунтовыми стоками с водосбора озера обнаружено при анализе проб интерстициальных вод, отобранных из лунок на пляжах зоны заплеска. Эта примыкающая к берегам зона расположена выше уровня воды и подвержена наиболее активному влиянию хозяйственной деятельности человека [24]. По сравнению с относительно однородным элементным составом интерстициальных вод фоновых участков, вода участков, сопряженных с территориями населенных пунктов и рекреаций, нередко отличается не только повышенными концентрациями химических элементов, но и большим разбросом их значений. Наиболее заметные различия в этом отношении характерны для содержания Cl, Na, K, S, Mg и в некоторых случаях P (рис. 2).

Рост содержания слабо- и малоподвижных элементов, особенно Si, Mn, Co, Ba (см. рис. 2), в интерстициальных водах большинства участков заплесковой зоны может быть связан как с наличием растворенных соединений этих элементов в загрязненных стоках, так и с присутствием в их составе

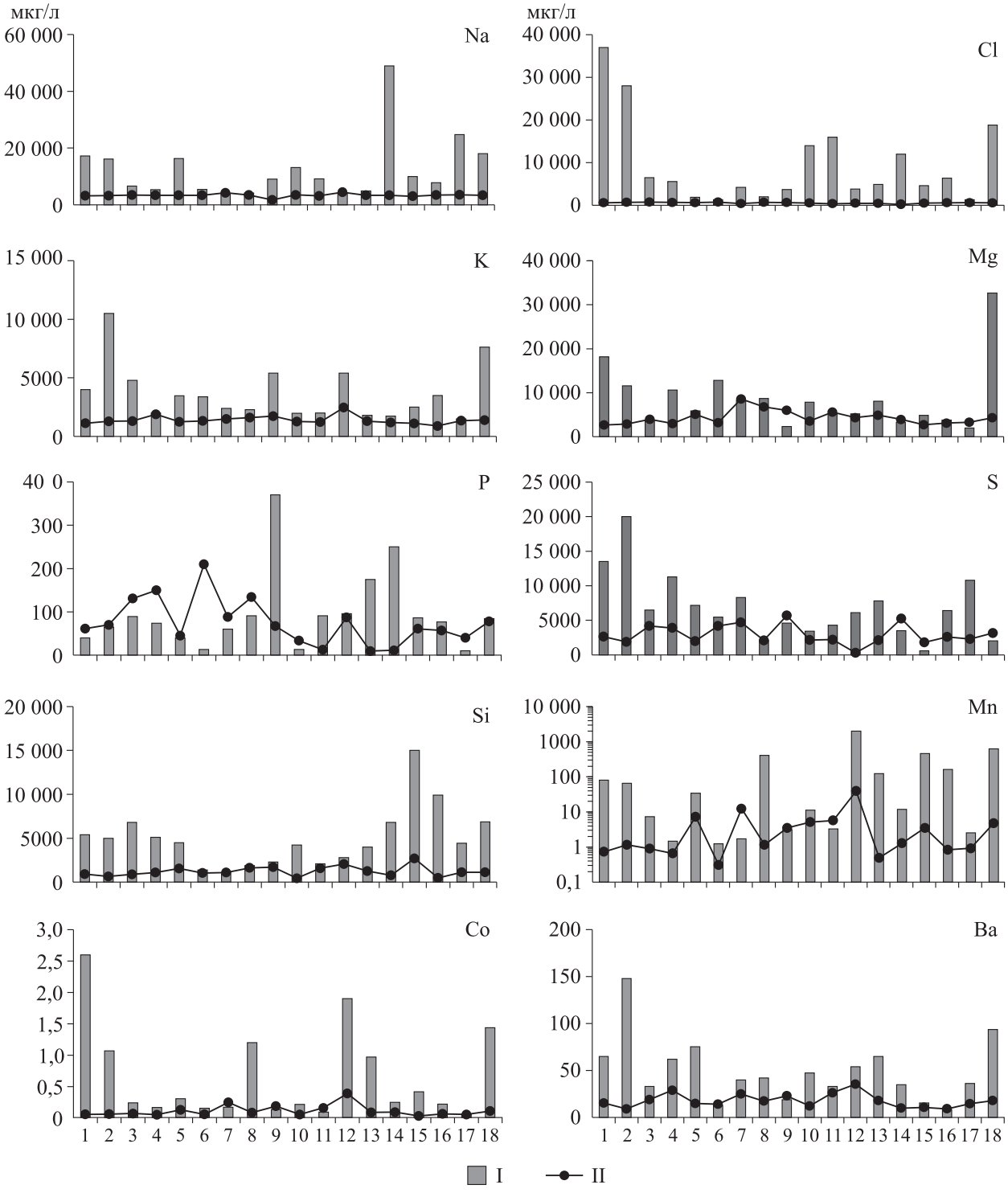


*Рис. 2.* Содержание Na, Cl, K, Mg, P, S в пробах интерстициальных вод зоны заплеска.

Дата и место отбора проб: *а* — участки, сопряженные с территориями населенных пунктов и рекреаций: *1* — 07.06.18, пос. Листвянка, кафе «Подкова»; *2* — 01.06.13, пос. Култук, пляж со скоплением гниющих водорослей; *3* — 01.06.13, пос. Култук, чистый пляж; *4* — 01.06.13, г. Слюдянка; *5* — 06.06.18, территория БЦБК; *6* — 17.06.17, пос. Большое Голоустное; *7* — 15.06.18, пос. Большое Голоустное; *8* — 08.06.18, бухта Ая; *9* — 03.06.13, пос. Хужир (о. Ольхон); *10* —16.06.17, пос. Хужир; *11* — 08.06.18, пос. Хужир; *12* — 04.06.13, пос. Максимиха (Баргузинский залив); *13* — 04.06.13, пос. Максимиха, турбаза; *14* — 05.06.13. пос. Усть-Баргузин; *15* — 19.06.11, пос. Монахово (Чивыркуйский залив); *16* — 04.06.13, пос. Монахово; *17* — 15.06.17, бухта Фролиха, северо-восточная

часть озера; *18* — 12.06.18, пос. Заречный. *б* — фоновые участки: *1* — 01.06.13, мыс Березовый; *2* — 05.06.18, мыс Березовый; *3* — 01.06.13, севернее устья р. Бугульдейки; *4* — 03.06.13, бухта Хоргойская (о. Ольхон); *5* — 14.06.18, мыс Ижимей (о. Ольхон); *6* — 05.06.13, северо-западная часть о. Большой Ушканий; *7* — 14.06.18, северо-западная часть о. Большой Ушканий; *8* — 09.06.18, бухта Академическая (о. Большой Ушканий); *9* — 10.06.18, северо-западная часть о. Большой Ушканий; *10* — 11.06.17, бухта Академическая (о. Большой Ушканий); *11* — 12.06.17, западный берег о. Тонкий (Ушканьи острова); *12* — 19.06.11, бухта Фертик (Чивыркуйский залив); *13* — 12.06.17, восточный берег о. Тонкий (Ушканьи острова); *14* — 13.06.17, мыс Елохин; *15* — 11.06.18, мыс Большой Солонцовый; *16* — 15.06.17, севернее пади Варначка (бухта Большие Коты); *17* — 15.06.18, севернее устья р. Черной (бухта Большие Коты). *18* — среднее содержание в пробах интерстициальной воды фоновых участков ($n$ = 32).

компонентов, активизирующих по пути движения сточных вод процессы разрушения почвенного покрова, горных пород и пляжных грунтов. Агрессивным компонентом поверхностных и грунтовых стоков могут быть растворенные соли и кислоты, входящие в состав бытовых сточных вод или образующиеся при разложении органических соединений сточных вод, скоплений твердых бытовых отходов, почвенного покрова и растительного опада. Значительная часть загрязняющих веществ бытовых сточных вод скапливается в грунтах зоны заплеска [24] и благодаря практически постоянному движению волн выносится в прибрежную воду. Поэтому фиксируемое увеличение концентрации Cl, Na, K, S, Mg, P, Si, Mn, Co, Ba в интерстициальной воде выше фонового уровня говорит о регулярном притоке в зону заплеска загрязненных поверхностных и грунтовых вод.

Содержание химических элементов в водной среде — один из внешних факторов, влияющих на концентрирование химических элементов гидробионтами. Самое высокое содержание Na и Cl, в большом количестве поступающих с загрязненными хозяйственно-бытовыми стоками, характерно для состава спирогиры, собранной на участках литорали, сопряженных с населенными пунктами (табл. 2, 3). Повышенные концентрации этих элементов установлены и в составе спирогиры, собранной в устье р. Черной (бухта Большие Коты), рядом с постоянным местом отдыха неорганизованных туристов и неблагоустроенной турбазой, расположенной в долине реки (с 2003 г.), в 200 м от устья, а также в р. Ангаре в черте Иркутска (ниже прудов-отстойников поверхностных и бытовых сточных вод). Содержание Na, Cl в пробах спирогиры, собранных в бухте Песчаной, береговая зона которой

Таблица 2

**Содержание химических элементов (± стандартное отклонение) в составе водорослей *Spirogyra* sp., мкг/г сухой массы (залив Лиственничный, пос. Листвянка; бухта Большие Коты; г. Байкальск)**

| Элемент | Залив Лиственничный, пос. Листвянка | | | | | Бухта Большие Коты, устье р. Черной | Байкальск, территория БЦБК |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | против устья р. Сеннушки | против устья р. Большой Черемшанки | | | мыс Березовый | | |
| | глубина 1,5–3 м | | | | | глубина 0,5–1 м | глубина 3 м |
| | 22.07.17, $n$ = 2 | 28.07.16, $n$ = 2 | 02.11.16, $n$ = 1 | 02.11.16, $n$ = 4 | 03.11.16, $n$ = 3 | 15.09.18, $n$ = 3 | 06.06.18, $n$ = 1 |
| Li | 1,84 | 5,48 | 3,75 | 6,10 ± 0,98 | 4,20 ± 0,26 | 5,07 ± 1,62 | 1,54 |
| Na | 4500 | 13500 | 5600 | 8300 ± 1800 | 4900 ± 150 | 28 100 ± 8800 | 1900 |
| Mg | 2200 | 4200 | 4800 | 6500 ± 400 | 5200 ± 200 | 1600 ± 200 | 1400 |
| Si | 150 | 750 | 130 | 130 ± 10 | 110 ± 20 | 170 ± 40 | 70 |
| P | 1700 | 1400 | 3300 | 3400 ± 60 | 3200 ± 100 | 1600 ± 400 | 1600 |
| S | 4600 | 6900 | 5000 | 5800 ± 60 | 5600 ± 230 | 7700 ± 750 | 2500 |
| Cl | 560 | – | 1900 | 2700 ± 100 | 1200 ± 300 | 3700 ± 1200 | 200 |
| K | 7100 | 6500 | 9000 | 8500 ± 500 | 9500 ± 700 | 6900 ± 2100 | 3700 |
| Ca | 4800 | 9000 | 7800 | 7500 ± 2100 | 8300 ± 2100 | 3500 ± 500 | 3200 |
| Mn | 380 | 1150 | 870 | 1060 ± 10 | 960 ± 40 | 30 ± 6 | 280 |
| Co | 2,52 | 4,10 | 6,28 | 6,20 ± 0,10 | 4,97 ± 0,15 | 1,67 ± 0,36 | 0,56 |
| Ni | 8,30 | 6,00 | 24,7 | 36,0 ± 3,2 | 23,3 ± 0,6 | 0,90 ± 0,1 | 2,80 |
| Cu | 5,55 | 9,63 | 9,80 | 14,6 ± 0,6 | 7,30 ± 0,26 | 4,40 ± 1,50 | 3,60 |
| Zn | 60 | 130 | 140 | 210 ± 30 | 54 ± 6 | 52 ± 10 | 30 |
| Ba | 2600 | 6000 | 5600 | 6400 ± 200 | 6300 ± 200 | 1300 ± 350 | 2000 |

Таблица 3

**Содержание химических элементов (± стандартное отклонение) в составе водорослей *Spirogyra* sp., мкг/г сухой массы (устье р. Бугульдейки, бухта Песчаная, пос. Заречный, бухта Сеногда, пос. Танхой, г. Иркутск)**

| Элемент | Против устья р. Бугульдейки | Бухта Песчаная | Пос. Заречный | Бухта Сеногда | Бурятия, Кабанский район, пос. Танхой | Иркутск, р. Ангара, левый берег, Академический мост |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | глубина 1–1,5 м | | | | | |
| | 23.07.17, n = 1 | 30.07.18, *n* = 2 | 12.06.18, *n* = 2 | 12.06.18, *n* = 1 | 30.09.14, *n* = 1 | 11.08.18, *n* = 1 |
| Li | 3,00 | 2,10 | 8,10 | 4,00 | 0,71 | 3,80 |
| Na | 8200 | 4300 | 21 550 | 9400 | 14 500 | 13 400 |
| Mg | 2400 | 1830 | 1945 | 2100 | 1770 | 2600 |
| Si | 120 | 130 | 90 | 110 | 350 | 300 |
| P | 1300 | 1200 | 1700 | 2100 | 1800 | 3900 |
| S | 3300 | 3200 | 5750 | 4800 | 2200 | 6000 |
| Cl | 650 | 340 | 3200 | 1580 | 7100 | 2300 |
| K | 4200 | 4900 | 6300 | 5600 | 3500 | 14 400 |
| Ca | 4800 | 3900 | 5100 | 4900 | 5800 | 6400 |
| Mn | 850 | 1000 | 1700 | 1100 | 150 | 1200 |
| Co | 2,00 | 0,80 | 9,55 | 5,40 | 6,30 | 4,90 |
| Ni | 4,10 | 3,90 | 3,00 | 3,20 | 8,70 | 6,10 |
| Cu | 7,80 | 3,45 | 3,80 | 3,30 | 10,5 | 9,70 |
| Zn | 94 | 28 | 18 | 16 | 173 | 75 |
| Ba | 2200 | 2145 | 2550 | 4500 | 2800 | 3300 |

в течение десятков лет используется как рекреационный ресурс, заметно меньше. Очевидно, мощная толща аллювиально-пролювиальных песчаных отложений береговой и прибрежной зоны бухты слабо препятствует вертикальной и горизонтальной миграции подвижных форм соединений химических элементов. Из отобранных проб водорослей этого рода наименьшее содержание Na, Cl, Mg, Si, S, Ca, Co установлено в составе спирогиры, собранной на участке литорали, сопряженном с территорией неработающего Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) (см. табл. 2).

В элементном составе спирогиры преобладают Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Mn, Ba. На их долю приходится 96–99 % суммарного содержания определяемых элементов. Этими же элементами обогащены бытовые сточные воды [7, 9], загрязненные поверхностные и грунтовые стоки [2] и, соответственно, интерстициальные воды зоны заплеска (см. рис. 2). В составе спирогиры, растущей на участках, сопряженных с населенными пунктами, Na > Ca, K, S > Mg, Ba, P > Cl, Mn. В водорослях, собранных в прибрежной зоне некоторых других участков (южная часть залива Лиственничного, мыс Березовый, территория БЦБК, бухта Песчаная, р. Ангара), K ≥ Ca, S, Ba ≥ Na ≥ Mg ≥ P > Cl, Mn или K ≥ Na, Ca, S > P, Ba > Cl, Mn (см. табл. 2, 3). Несмотря на это различие, водоросли рода *Spirogyra*, по сравнению с водорослями растительных поясов литорали, во всех случаях являются самым эффективным концентратором Na, Mn, Ba. Их содержание в составе сырой биомассы спирогиры по медианным значениям больше, чем в воде прибрежной зоны, в 270, 40 000 и 23 000 раз соответственно. Содержание Na, Mn, Ba в байкальских бентосных водорослях значительно ниже (рис. 3) и превосходит концентрацию этих элементов в воде в 2–15, 630–2600, 20–340 раз соответственно. Из микроэлементов, содержание которых в сухой массе водорослей <10 мкг/г, *Spirogyra* spp. концентрирует Li и Co намного интенсивнее, чем *Ulothrix zonata*, *Tetraspora cylindrica*, *Didymosphenia geminata*, *Draparnaldioides*,. В составе сырой массы спирогиры Li (по медианным значениям) больше, чем в воде прибрежной зоны, в 160, Co — в 9200 раз. В сырой массе типичных байкальских водорослей по сравнению с водой накапливается всего в 3–10 раз больше Li и в 900–1400 — Co.

По способности концентрировать Mg, P, S, Cl, K, Ca спирогира мало отличается от бентосных водорослей растительных поясов, за исключением *T. cylindrica*, наиболее слабого концентратора многих элементов. Исследуемые водоросли примерно в равной степени накапливают фосфор, от 2000 до 4000 мкг/г сухой массы. Самое высокое содержание серы, 10 000–26 000 мкг/г, характерно для талломов *U. zonata* и *D. geminata*. Много калия, примерно 15 000–30 000 мкг/г, поглощают *Draparnaldia*

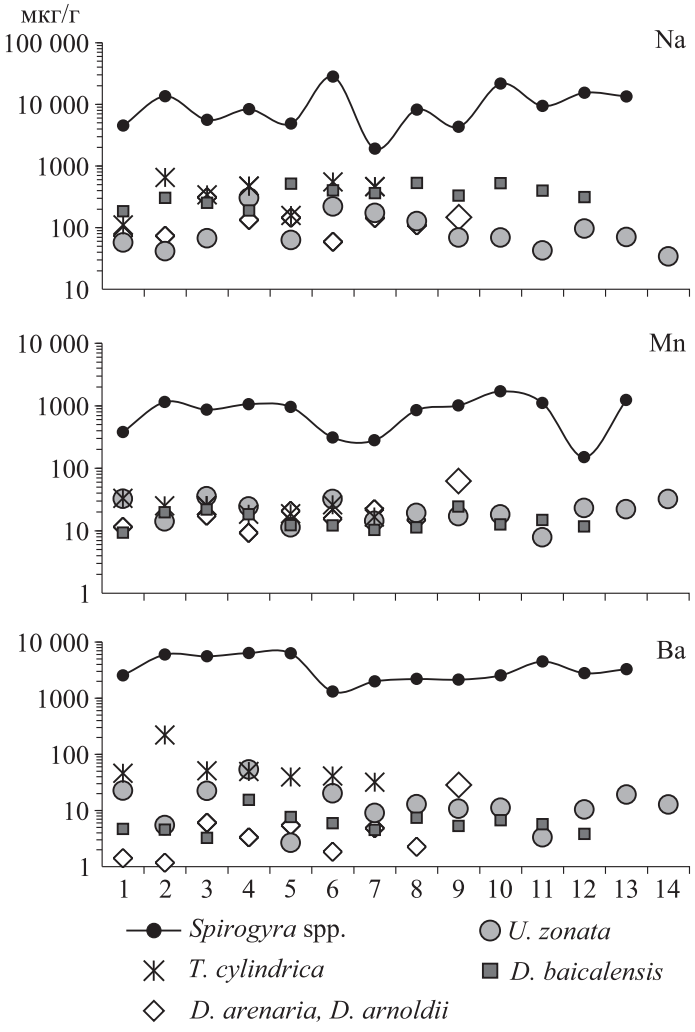


*Рис. 3.* Содержание Na, Mn, Ba в сухой массе бентосных водорослей.

Название водоросли, дата и место отбора проб: *1 — Spirogyra* sp., 28.07.2016, пос. Листвянка, против устья р. Сеннушки; *Ulothrix zonata*, 20.06.2011, бухта Фертик (Чивыркуйский залив); *Tetraspora cylindrica*, 26.06.2003, мыс Березовый; *Draparnaldia baicalensis*, 09.09.2009, стационар ЛИН СО РАН, падь Варначка, 300 м севернее устья р. Черной (бухта Большие Коты) (*n* = 10); *Draparnaldioides arenaria*, *D. arnoldii*, 16.07.2014, бухта Большие Коты; *2 — Spirogyra* sp., 28.07.16, 02.11.16, пос. Листвянка, против устья р. Большой Черемшанки; *Ulothrix zonata*, 21.06.2011, мыс Зама (пролив Малое Море); *Tetraspora cylindrica*, 18.07.2004, о. Большой Ушканий; *Draparnaldia baicalensis*, 27.08.2010, 27.06.2011, бухта Большие Коты; *Draparnaldioides arenaria*, *D. arnoldii*, 16.07.2014, бухта Большие Коты; *3 — Spirogyra* sp., 28.07.16, 02.11.16, пос. Листвянка, против устья р. Большой Черемшанки; *Ulothrix zonata*, 28.07.16, пос. Листвянка; *Tetraspora cylindrica*, 10.07.2008, 25.07.2010, бухта Большие Коты; *Draparnaldia baicalensis*, 16.07.2014, бухта Большие Коты; *Draparnaldioides arenaria*, *D. arnoldii*, 06.06.18, против устья р. Бабхи; *4 — Spirogyra* sp., 28.07.16, 02.11.16, пос. Листвянка, против устья р. Большой Черемшанки; *Ulothrix zonata*, 20.07.17, мыс Березовый; *Tetraspora cylindrica*, 10.07.2008, 25.07.2010, бухта Большие Коты; *Draparnaldia baicalensis*, 02.08.2011, бухта Большие Коты; *Draparnaldioides arenaria*, *D. arnoldii*, 30.07.18, пролив Малое Море; *5 — Spirogyra* sp., 03.11.16, мыс Березовый; *Ulothrix zonata*, 20.07.17, мыс Березовый; *Tetraspora cylindrica*, 16.07.2014, бухта Большие Коты; *Draparnaldia baicalensis*, 28.07.16, пос. Листвянка; *Draparnaldioides arenaria*, *D. arnoldii*, 21.07.18, пос. Култук; *6 — Spirogyra* sp., 15.09.18, устье р. Черной (бухта Большие Коты); *Ulothrix zonata*, 23.07.17, против устья р. Бугульдейки; *Tetraspora cylindrica*, 20–25.07.17, мыс Зама (пролив Малое Море), мыс Ижимей (о. Ольхон); *Draparnaldia baicalensis*, 20.07.17, мыс Березовый; *Draparnaldioides arenaria*, *D. arnoldii*, 26.07.17, бухта Песчаная; *7 — Spirogyra* sp., 06.06.18, территория БЦБК; *Ulothrix zonata*, 24.07.17, 27.07.17, мыс Зама (пролив Малое Море), мыс Ижимей (о. Ольхон); *Tetraspora cylindrica*, 05.06.2018, 30.07.2018, мыс Березовый, пролив Малое Море, о. Большой Ушканий (*n* = 4); *Draparnaldia baicalensis*, 24.07.17, мыс Зама (пролив Малое Море); *Draparnaldioides arenaria*, *D. arnoldii*, 20–26.07.17, бухта Половинная, пос. Култук, бухта Песчаная (*n* = 7); *8 — Spirogyra* sp., 23.07.17, против устья р. Бугульдейки; *Ulothrix zonata*, 27.07.17, стационар ЛИН СО РАН (бухта Большие Коты); *Draparnaldia baicalensis*, 22.07.17, пос. Листвянка; *Draparnaldioides arenaria*, *D. arnoldii*, 30.07.2018, бухта Песчаная, пролив Малое Море (*n* = 9); *9 — Spirogyra* sp., 30.07.18, бухта Песчаная; *Ulothrix zonata*, 03–10.06.2018, пос. Листвянка, мыс Березовый, бухта Большие Коты, бухта Ая, БЦБК, пос. Хужир, о. Большой Ушканий, мыс Елохин (*n* = 16); *Draparnaldia baicalensis*, 26.07.17, бухта Песчаная; *9* (маркер большего размера) — *Didymosphenia geminata*, 24–25.07.17, мыс. Зама, мыс Ижимей (*n* = 2); *10 — Spirogyra* sp., 12.06.18, пос. Заречный; *Ulothrix zonata*, 05.06.2018, устье р. Бабхи (БЦБК); *Draparnaldia baicalensis*, 27.07.17, бухта Большие Коты; *11 — Spirogyra* sp., 12.06.18, бухта Сеногда; *Ulothrix zonata*, 20.07.18, о. Большой Ушканий, о. Тонкий (Ушканьи острова); *Draparnaldia baicalensis*, 20–25.07.17, мыс Зама, пос. Листвянка, бухта Песчаная (*n* = 20); *12 — Spirogyra* sp., 27.09.2014, пос. Танхой; *Ulothrix zonata*, 23.07.18, пос. Хужир; *Draparnaldia baicalensis*, 20–25.07.2018, о. Тонкий (Ушканьи острова), бухта Песчаная, пролив Малое Море (*n* = 20); *13 — Spirogyra* sp., 11.08.18, р. Ангара (в черте Иркутска); *Ulothrix zonata*, 03.08.2018, стационар ЛИН СО РАН (бухта Большие Коты); *14 — Ulothrix zonata*, 15.09.2018, 500 м севернее устья р. Черной (бухта Большие Коты).

Таблица 4

**Содержание химических элементов (± стандартное отклонение) в пробах воды прибрежной зоны, мкг/л (поселки Култук и Заречный)**

| Элемент | Пос. Култук | | | | Пос. Заречный | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 м от уреза, n = 9 | лунка, 1 м выше уреза, *n* = 2 | вода из массы БСД | лунка под БСД | 1 м от уреза | вода из массы БСД | лунка под БСД, 1 м выше уреза | |
| | 01.06.2013 | | | | 12.06.2017 | | | 12.06.2018 |
| Li | 1,77 ± 0,05 | 1,04 | 75,0 | 2,80 | 1,63 | 9,10 | 4,90 | 17,6 |
| Na | 3100 ± 70 | 5600 | >79 000 | 16 100 | 2100 | >34000 | 11 500 | 57 500 |
| Mg | 2800 ± 100 | 4600 | 29 000 | 11 600 | 2800 | 49 000 | 40 000 | 29 000 |
| Si | 650 ± 200 | 4340 | 8100 | 5000 | 800 | 1160 | 6900 | 6500 |
| P | 29,0 ± 15,4 | 150 | 95,0 | 65,0 | 50,0 | 90,0 | 100 | 15,6 |
| S | 2700 ± 200 | 5400 | 28 000 | 20 000 | 1800 | 67 000 | 1350 | 2210 |
| Cl | 810 ± 250 | 5000 | 155 000 | 28 000 | 450 | 43 000 | 27 000 | 18 400 |
| K | 900 ± 60 | 3700 | >111 000 | 10 500 | 910 | >44 000 | 6400 | 18 300 |
| Ca | 15100 ± 500 | 23 750 | 184 000 | 64 000 | 14 400 | 160 000 | 103 000 | 113 000 |
| Mn | 1,67 ± 0,67 | 5,55 | 2300 | 70 | 13,8 | 180 | 620 | 2600 |
| Fe | 19,0 ± 6,6 | 111 | 37 000 | 53 | 100 | 220 | 21 000 | 240 |
| Co | 0,046 ± 0,008 | 0,22 | 18,0 | 1,07 | 0,072 | 1,13 | 2,00 | 10,1 |
| Ni | 0,20 ± 0,04 | 1,42 | 10,0 | 1,74 | 0,37 | 3,50 | 1,89 | 8,14 |
| Ba | 15,6 ± 1,9 | 32,0 | 800 | 150 | 17,5 | 230 | 120 | 190 |
| Pb | 0,040 ± 0,008 | 0,39 | 2,0 | 0,49 | 0,069 | 0,13 | 0,020 | 0,024 |

Таблица 5

**Содержание химических элементов (± стандартное отклонение) в пробах воды и ацетатно-аммонийных вытяжках грунтов прибрежной зоны, мкг/л (бухта Сеногда)**

| Элемент | Бухта Сеногда, 15.06.2017, 12.06.2018 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | пробы воды | | | | ацетатно-аммонийные вытяжки проб грунта | |
| | 1 м от уреза | 1 м от уреза (с БСД) | лунка, 1 м выше уреза, *n* = 3 | лунка под БСД | лунка, 1 м выше уреза, *n* = 3 | лунка под БСД, 15 м от уреза, *n* = 2 |
| Li | 1,79 | 3,10 | 2,10 ± 0,20 | 2,60 | 2,60 ± 1,60 | 13,6 |
| Na | 3000 | 4800 | 3900 ± 1100 | 5100 | 310 ± 160 | 18 300 |
| Mg | 2950 | 9400 | 4200 ± 550 | 4100 | 1690 ± 270 | 32 000 |
| Si | 500 | 1450 | 700 ± 120 | 3000 | 580 ± 180 | 1690 |
| P | 7,85 | 230 | 10,9 ± 2,0 | < 40 | 52,0 ± 19,1 | 720 |
| S | 1900 | 2800 | 2100 ± 140 | 5600 | 2100 ± 740 | 15 800 |
| Cl | 370 | 4600 | 410 ± 80 | 7700 | <400 | 10 300 |
| K | 820 | 3700 | 1050 ± 80 | 2300 | 750 ± 210 | 11 400 |
| Ca | 13 800 | 51 000 | 18 500 ± 3000 | 17 600 | 15 100 ± 2250 | 210 000 |
| Mn | 30,5 | 3000 | 500 ± 250 | 5200 | 450 ± 330 | 4700 |
| Fe | 97,1 | 2200 | 130 ± 20 | 5600 | 30,0 ± 8,9 | 760 |
| Co | 0,098 | 4,40 | 0,48 ± 0,10 | 1,55 | 1,08 ± 0,59 | 23,0 |
| Ni | 0,63 | 3,70 | 1,05 ± 0,26 | 1,52 | 1,34 ± 0,61 | 25,0 |
| Ba | 30,8 | 420 | 48,1 ± 15,2 | 44,0 | 340 ± 130 | 2000 |
| Pb | 0,050 | 0,089 | 0,063 ± 0,003 | 0,14 | 0,16 ± 0,12 | 0,81 |

Примечание. БСД — береговые скопления детрита (основной компонент БСД — разлагающаяся масса водорослей рода *Spirogyra*).

*baicalensis*, *D. arenaria*, *D. arnoldii*. В пробах спирогиры, отобранных на разных участках литорали, значения содержания калия относительно однородны и немного ниже, чем в составе *Draparnaldioides*. Исключение — высокая концентрация калия в спирогире из р. Ангары. Медианные значения содержания хлора в *Spirogyra* spp., *D. baicalensis*., *D. arenaria*, *D. arnoldii*, *U. zonata* не имеют выраженных различий и колеблются в пределах 900–2000 мкг/г. Спирогира выделяется из этого ряда широким диапазоном концентраций хлора и самым высоким его максимальным содержанием. *Spirogira* spp., *U. zonata* и *D. baicalensis* извлекают из водной среды и включают в свой состав (по медианным значениям) от 5100 до 6700 мкг/г кальция, в 2–3 раза больше, чем *T. cylindrica*, *D. arenaria*, *D. arnoldii*. Последние два вида отличаются наиболее высоким содержанием магния, от 6600 до 18 600 мкг/г, и нетипичным для большинства растений отношением Ca/Mg = 0,11–0,69. Особенно много кальция (от 36 000 до 42 000 мкг/г сухой массы) концентрируют ветвистые колонии *D. geminata*, синтезирующие в минерализованной полисахаридной матрице своих стебельков кальцитовый нановолокнистый каркас [25].

Таким образом, бентосные водоросли литорали: *U. zonata*, *T. cylindrica*, *D. geminata*, виды рода *Draparnaldioides*, способны так же активно, как и *Spirogyra* spp., поглощать, накапливать в своем составе и использовать для роста, развития, формирования биомассы значительную часть Mg, P, S, Cl, K, Ca, поступающих в прибрежные воды с загрязненными стоками. Однако типичные байкальские водоросли — очень слабые концентраторы Li, Na, Mn, Co, Ba (см. рис. 2), повышенное содержание которых, за исключением Li, обнаружено в интерстициальной воде участков зоны заплеска, сопряженных с населенными пунктами и рекреациями (см. рис. 2).

Спирогира в период активного роста и развития в условиях постоянного притока загрязненных поверхностных и грунтовых вод извлекает из водной среды и удерживает в своем составе значительную долю Li, Na, K, Ca, Mg, Ba, S, Cl, P, Mn, Si, Zn, Zn Co, Ni (см. табл. 2, 3). В этом случае масса водорослей рода *Spirogyra* является одним из компонентов биогеохимического барьера прибрежной зоны, на котором происходит накопление и резкое уменьшение интенсивности миграции макро- и микроэлементов, поступающих в прибрежные воды с площади водосбора озера. Огромная масса отмершей спирогиры на пляжах зоны заплеска, в воде и на дне мелководной зоны, напротив, в течение многих лет обогащает прибрежные воды всем комплексом накопленных элементов и является источником вторичного загрязнения. Разлагающаяся масса регулярно пополняется свежими выбросами водорослей, промывается прибойными потоками, частично выносится волнами в прибрежные воды или перемещается в глубь пляжей. В пробах воды, отобранных из толщи разлагающейся спирогиры, в наибольшем количестве обнаружены преобладающие в ее составе Li, Na, Mg, S, Cl, K, Ca, Mn, Fe, Ba. В грунтах зоны заплеска, расположенных в 10–15 м от уреза, перекрытых толстым слоем гниющей спирогиры, по сравнению с грунтами без таких скоплений, повышено содержание подвижных, легко переходящих в раствор соединений Ca > Mg > Na, S > K, Cl > Mn > Ba > Fe, P > Li, Co, Ni > Pb. Соответственно, в интерстициальной воде зоны заплеска и прибрежной воде с массовым скоплением отмершей спирогиры, несмотря на постоянное воздействие прибойных потоков, установлено значительное повышение концентрации большинства из этих элементов (табл. 4, 5). Мощные скопления спирогиры разной степени разложения становятся еще одним длительно действующим источником потока химических элементов в прибрежную зону озера.

Продолжительное поступление загрязненных поверхностных, грунтовых и бытовых сточных вод, разложение мощных скоплений спирогиры, обогащенных подвижными соединениями Na, K, Cl, S, Mn, Co, Ba, способствуют формированию неблагоприятного для жизнедеятельности байкальских водорослей элементного состава прибрежных вод и увеличению минерализации водной среды. Как правило, с ростом содержания ионов $Na^+$ и $Cl^-$ минерализация воды увеличивается [17, 26].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных в прибрежной зоне оз. Байкал, установлено, что в составе интерстициальных вод участков зоны заплеска, сопряженных с территориями населенных пунктов и рекреаций, в различной степени увеличилось содержание Na, Mg, Si, P, S, Cl, K, Mn, Co, Ba.

Повышение концентрации Na, Mg, Si, P, S, Cl, K, Mn, Co, Ba в интерстициальных водах зоны заплеска, распространение в прибрежной зоне Байкала водорослей рода *Spirogyra*, интенсивно поглощающих и накапливающих Li, Na, Cl, Mn, Co, Ba, говорят о значительно возросшем притоке в воду литорали этих элементов.

По способности концентрировать Li, Na, Mn, Co, Ba спирогира значительно превосходит байкальские бентосные водоросли. Формируя на участках литорали, сопряженных с населенными пунктами, большую биомассу, спирогира способствует снижению в загрязненной водной среде доступных соединений многих химических элементов, особенно Li, Na, Cl, Mn, Co, Ba, повышенный приток которых обусловлен сбросом загрязненных сточных вод с площади водосбора озера. Мощные скопления в прибрежной зоне медленно разлагающейся спирогиры становятся дополнительным источником загрязнения прибрежных вод Байкала.

*Работа выполнена в рамках тем государственного задания (0345–2019–0010, 0345–2019–0009, 0345–2019–0008).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. **Кравцова Л.С., Ижболдина Л.А., Ханаев И.В., Помазкина Г.В., Домышева В.М., Кравченко О.С., Грачёв М.А.** Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в прибрежной части залива Лиственничный озера Байкал // Докл. РАН. — 2012. — Т. 447, № 2. — С. 227–229.
2. **Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.В.** Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали // География и природ. ресурсы. — 2016. — № 6. — С. 43–54.
3. **Волкова Е.А.** Загадки байкальской спирогиры // Наука из первых рук. — 2016. — Т. 68, № 2. — С. 20–29.
4. **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.
5. **Штыкова Ю.Р., Суслова М.Ю., Косторнова Т.Я., Суханова Е.В., Пестунова О.С., Горшкова А.С., Галачьянц А.Д., Парфёнова В.В.** Мониторинг санитарно-микробиологического состояния пелагиали озера Байкал и устьев впадающих в него крупных рек с 2010 по 2015 г. // Изв. Ирк. ун-та. Сер. Биология. Экология. — 2016. — Т. 17. — С. 50–61.
6. **Филиппов В.Н., Зиновьев А.П., Рыжов Г.И., Зиновьев С.А., Рыжова С.А.** Оборудование и технология очистки сточных вод, примеры расчета на ЭВМ. — Уфа: Изд-во Уфим. нефт. техн. ун-та, 2003. — С. 7.
7. **Берёзов Т.Т., Коровкин Б.Ф.** Биологическая химия: Учебник. 3-е изд. — М.: Медицина, 1998. — С. 618–622.
8. **Ланцова И.В.** Влияние рекреационного использования на качество воды Иваньковского водохранилища // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2009. — № 1. — С. 45–50.
9. **Государственный** доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году» [Электронный ресурс]. — http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/b22/Доклад Байкал-07.12.2018-2.pdf (дата обращения 23.04.2019).
10. **Винокуров М.А., Суходолов А.П.** Туризм на Байкале и в Байкальском регионе // Экономика Иркутской области: В 4 т. — Иркутск: Изд-во Байкал гос. ун-та экономики и права. — 2004. — Т. 4. — 248 с.
11. **Ватькина Н.И.** Проблемы развития рекреации в Прибайкальском национальном парке // Молодой ученый. — 2018. — № 19. — С. 35–38.
12. **Пономаренко Е.А., Солодянкина С.В.** Трансформация прибрежных геосистем озера Байкал под воздействием рекреационной деятельности // Изв. Ирк. ун-та. Сер. Науки о Земле. — 2013. — Т. 6, № 1. — С. 147–160.
13. **Верболов В.И.** Течения и водообмен в Байкале // Водные ресурсы. — 1996. — Т. 23, № 4. — С. 413–423.
14. **Ветров В.А., Декин С.А.** Изучение распространения примеси с помощью радиоактивного индикатора // Течения в Байкале. — Новосибирск: Наука, 1977. — С. 133–143.
15. **Ижболдина Л.А.** Мейо- и макрофитобентос озера Байкал (водоросли). — Иркутск: Изд-во Ирк. ун-та, 1990. — 176 с.
16. **Вотинцев К.К.** Прогноз качества вод озера Байкал до 2000 г. // Тезисы V совещания географов Сибири и Дальнего Востока. Вып. 1: Теория и методы прогноза изменений географической среды. — Иркутск, 1973. — Ч. 2. — С. 39–40.
17. **Никаноров А.М.** Гидрохимия. 2-е изд. — СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. — С. 56–86.
18. **Хайлов К.М., Ковардаков С.А., Празукин А.В.** Балансовые условия поддержания качества морской среды в рекреационных акваториях // Геополитика и экогеодинамика регионов. — Симферополь: Изд-во Таврич. национ. ун-та, 2005. — Т. 1, вып. 2. — С. 75–82.
19. **Rajfur M., Kłos A.** Use of algae in active biomonitoring of surface waters // Ecological Chemistry and Engineering S. — 2014. — Vol. 21, N 4. — P. 561–576.
20. **Wong L.Sh., Wen Yi.K.** Defection of calcium and sodium using Green algae Spirogyra // Transactions on science and Technology. — 2016. — Vol., N 1. — P. 8–12.
21. **Сайбаталова Е.В., Куликова Н.Н., Сутурин А.Н., Парадина Л.Ф., Пахомова Н.Н., Воднева Е.Н., Семитуркина Н.А.** Влияние способов пробоподготовки на результаты определения элементного состава пресноводных губок методом ИСП // Журн. аналит. химии. — 2010. — Т. 65, № 7. — С. 691–698.

22. **Сутурин А.Н., Куликова Н.Н., Бойко С.М., Сайбаталова Е.В.** Извлечение химических элементов из горных пород байкальской водой и органическими соединениями // Геохимия. — 2013. — № 5. — С. 471–480.
23. **Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N., Semenov A.R., Lozhkin V.I., Petrov L.L.** Preparation and assessment of a candidate reference sample of lake Baikal deep water // Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy. — 2003. — Vol. 58. — P. 277–288.
24. **Тимошкин О.А., Сутурин А.Н., Бондаренко Н.А., Куликова Н.Н., Рожкова Н.А., Шевелева Н.Г., Оболкина Л.А., Домышева В.М., Зайцева Е.П., Мальник В.В., Максимова Н.В., Томберг И.В., Непокрытых А.В., Широкая А.А., Лухнев А.Г., Попова О.В., Потапская Н.В., Вишняков В.С., Волкова Е.А., Зверева Ю.М., Логачёва Н.Ф., Сакирко М.В., Косторнова Т.Я.** Биология прибрежной зоны озера Байкал. Сообщ. 1: Заплесковая зона: первые результаты междисциплинарных исследований, важность для мониторинга экосистемы // Изв. Ирк. ун-та. Сер. Биология. Экология. — 2011. — Т. 4, № 4. — С. 75–110.
25. **Ehrlich H., Motylenko M., Sundareshwar P.V., Ereskovsky A., Zgłobicka I., Noga T., Płocinski T., Tsurkan M.V., Wyroba E., Suski S., Bilski., Wysokowski M., Stöcker H., Makarova A., Vyalikh D., Walter J., Molodtsov S.L., Bazhenov V.V., Petrenko I., Langer E., Richter A., Niederschlag E., Pisarek M., Springer A.I., Gelinsky M., Rafaja D., Witkowski A., Meyer D.C., Jesionowski T., Kurzydłowski K.J.** Multiphase Biomineralization: Enigmatic Invasive Siliceous Diatoms Produce Crystalline Calcite // Advanced Functional Materials. — 2016. —Vol. 26, N 15. — P. 2503–2510.
26. **Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В.** Геохимия окружающей среды. — М.: Недра, 1976. — С. 118–124.

*Поступила в редакцию 08.11.2019*
*После доработки 09.07.2020*
*Принята к публикации 25.12.2020*