

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.052>Куликова Н.Н.<sup>1</sup>, Чебыкин Е.П.<sup>2</sup>, Волкова Е.А.<sup>3</sup>, Бондаренко Н.А.<sup>4</sup>, Воднева Е.Н.<sup>5</sup>, Сутурин А.Н.<sup>6</sup><sup>1</sup>Кандидат биологических наук, <sup>2</sup>кандидат химических наук, <sup>3</sup>аспирант, ведущий инженер, <sup>4</sup>доктор биологических наук, <sup>5</sup>ведущий инженер, <sup>6</sup>кандидат геолого-минералогических наук, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Работа выполнена в рамках государственного проекта «Влияние изменяющихся природных и антропогенных факторов на биогеохимические процессы на каменистой литорали Байкала» (0345-2016-0010) и Интеграционной программы ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА БЕНТОСНЫХ МАКРОВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ ИНДИКАЦИИ КАЧЕСТВА ВОДЫ МЕЛКОВОДНОЙ ЗОНЫ ЗАЛИВА ЛИСТВЕННИЧНЫЙ (ЮЖНЫЙ БАЙКАЛ)****Аннотация**

В течение многих лет в ручьи и реки, впадающие в залив, в подземные водоносные горизонты прибрежной зоны поступает основная масса хозяйственно-бытовых сточных вод поселка, не имеющего централизованной системы канализации. При этом в Листвянку ежегодно приезжают свыше миллиона человек; в поселке функционируют многочисленные объекты туристической инфраструктуры. В результате исследований установлено, что одним из факторов распространения спирогиры в заливе является сток загрязненных поверхностных вод. После стока через территорию поселка эти воды в наибольшей степени обогащаются хлором, натрием, калием, серой, марганцем, кобальтом, барием. Результаты определения методом ИСП-МС элементного состава *Ulothrix zonata* (Web. et Mohr.) Kütz., *Tetraspora cylindrica* (Wahlenb.) Ag. var. *bullosa* C. Meyer, *Draparnaldia baicalensis* C. Meyer, *Spirogira* spp. показали, что химические элементы, поступающие в прибрежную зону с загрязненным поверхностным и подземным стоком, в наибольшей степени аккумулирует спирогира. Она накапливает примерно в 200–20–80 раз больше натрия и в 8–2–40 раз больше хлора, чем *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica*. В отличие от них, в составе спирогиры содержание натрия примерно в 9–10 раз выше содержания фосфора, в 3–4 – хлора, в 1.5–2 – калия и кальция. Из исследуемых водорослей только в ее составе накапливается больше хлора, чем фосфора, примерно равные количества никеля и кобальта, больше марганца, чем железа и примерно в 80 раз больше бария, чем стронция.

**Ключевые слова:** поверхностный сток талых и речных вод, залив Лиственничный, прибрежная зона, литораль, химические элементы, бентосные водоросли, озеро Байкал.

Kulikova N.N.<sup>1</sup>, Chebykin E.P.<sup>2</sup>, Volkova E.A.<sup>3</sup>, Bondarenko N.A.<sup>4</sup>, Vodneva E.N.<sup>5</sup>, Suturin A.N.<sup>6</sup><sup>1</sup>PhD in Biology, <sup>2</sup>PhD in Chemistry, <sup>3</sup>ORCID: Postgraduate Student, Lead Engineer, <sup>4</sup>PhD in Biology, <sup>5</sup>Leading Engineer, <sup>6</sup>PhD in Geology and Mineralogy, Limnological Institute SB RAS, Irkutsk

Работа выполнена в рамках государственного проекта «Влияние изменяющихся природных и антропогенных факторов на биогеохимические процессы на каменистой литорали Байкала» (0345-2016-0010) и Интеграционной программы ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей».

**DETERMINATION OF THE ELEMENT COMPOSITION OF BENTHIC MACRO-ALGAE FOR THE INDICATION OF WATER QUALITY OF THE SHALLOW ZONE OF THE LISTVENNICHNYI BAY (SOUTH BAIKAL)****Abstract**

For many years, the main aquatic domestic waste water of the village with no centralized drain system have been entering the underground aquifers of the coastal zone, streams and rivers. At the same time, more than a million people come to Listvennichnyi Bay each year; there are many objects of tourist infrastructure in the village. As a result of the research, it was established that one of the factors of spirogira spread in the bay is the runoff of contaminated surface waters. After flowing through the territory of the village, these waters are most enriched with chlorine, sodium, potassium, sulfur, manganese, cobalt, barium. Results of ICP-MS determination of the elemental composition of *Ulothrix zonata* (Web. et Mohr.) Kütz., *Tetraspora cylindrica* (Wahlenb.) Ag. var. *bullosa* C. Meyer, *Draparnaldia baicalensis* C. Meyer, *Spirogira* spp. showed that chemical elements entering the coastal zone with contaminated surface and underground runoff accumulate spirogira to the greatest extent. It accumulates about 200-20-80 times more sodium and 8-2-40 times more chlorine than *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica*. In contrast, the sodium content in the spirogira is about 9-10 times higher than the phosphorus content, 3-4 in chlorine, 1.5-2 in potassium and calcium. As for the algae, its composition contains more chlorine accumulates than phosphorus, approximately equal amounts of nickel and cobalt, more manganese than iron and about 80 times more barium than strontium.

**Keywords:** surface runoff of thawed and river waters, Listvennichnyi Bay, coastal zone, littoral, chemical elements, benthic algae, Lake Baikal.

**В** Байкале основная масса донной растительности сосредоточена в зоне, занимающей глубины от 0 до 20 м и площадь 228 тыс. га. Еще в начале прошлого века К. И. Мейером [1] на большей части литорали оз. Байкал установлена зональность в распределении водорослей. Каждая зона (или пояс) сформированы определенным видом в зависимости от глубины озера и доступного субстрата для прикрепления водорослей (табл. 1). В трех первых

Таблица 1 – Видовой состав, глубины, время интенсивной вегетации и фитомасса макроводорослей 1–3 растительных поясов

Пояс	Глубины, м	Виды	Время вегетации и воздушно-сырая фитомасса [2] (г/м <sup>2</sup> )
1	0 – 1,5	<i>Ulothrix zonata</i> (Web. et Mohr.) Kütz	Круглогодично 100–400
2	≥ 1,5 – 2,5	<i>Tetraspora cylindrica</i> (Wahlenb.) Ag. var. <i>bullosa</i> C. Meyer, <i>Didymosphenia geminata</i> (Lingbye) M. Schmidt	Май-август, май-октябрь 200–600
3	≥ 2,5 – 10	Эндемичные виды рода <i>Draparnaldioides</i>	Апрель-ноябрь 700–1200

растительных поясах в весенне-осенний период вегетирует основная масса водорослей, которая ежегодно включается в круговорот веществ [2]. С сезонным развитием водорослей тесно связаны наблюдаемые в этой зоне колебания биомассы и численности зообентоса [3], [4].

Нарушения в структуре донных фитоценозов впервые установлены в 70–80-е годы прошлого века в районе сброса в озеро промышленных очищенных сточных вод (ПОСВ) Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. В этом районе были отмечены разреженные неравномерные заросли или полное отсутствие эндемиков *Tetraspora cylindrica* var. *bullosa* и *Draparnaldioides pilosa*, ранее сплошь покрывавших каменистый грунт на глубине от 1 до 3–3,5 м [5]. Наиболее устойчивым к воздействию ПОСВ оказался доминирующий в зоне прибоя *U. zonata*, который в годы депрессий *Tetraspora* и *Draparnaldioides* занимал участки дна, свободные от их зарослей. В небольшом количестве здесь появились не характерные для открытых прибрежий озера *Oedogonium* sp., *Spirogyra* sp., *Batrachospermum moniliforme* [5].

В июле–августе 2011 г. нарушение зональной поясности водорослей обнаружено в литорали залива Лиственничного, в пределах территории поселка Листвянки (Южный Байкал). В первом поясе изменений не отмечено; во втором *D. geminata* в составе доминантов отсутствовала, а на глубинах 2,5–10 м преобладала широко распространенная в водоемах Евразии зеленая нитчатая водоросль *Spirogyra* sp. [6], которая ранее встречалась в различных мелководных заливах Байкала лишь в виде единичных нитей [7]. Протяженность измененной зоны составила около 4 км. Севернее залива Лиственничного зональность в распределении водорослей оставалась в пределах нормы [6]. К нарушению сложившихся биоценозов литорали залива привела, по мнению [8], субкавальная разгрузка на глубине более двух метров подземных вод, загрязненных хозяйственно-бытовыми стоками многократно возросшего количества объектов туристической инфраструктуры. В течение многих лет в ручьи и реки, впадающие в залив, в подземные водоносные горизонты прибрежной зоны поступала и поступает основная масса хозяйственно-бытовых сточных вод разрастающегося поселка, не имеющего централизованной системы канализации [6]. Дополнительный стресс для гидробионтов мелководной зоны связан с замусориванием пляжей и несанкционированным сбросом прогулочными кораблями хозяйственно-бытовых и подсланевых вод [8], [9].

В 2013 г. скопления спирогиры были найдены практически вдоль всего побережья озера, особенно мощные – в местах расположения населенных пунктов: Северобайкальска, Слюдянки, Култука, Листвянки, Больших Котов, Байкальска, Максимихи [10], [11].

По данным [12] массовое развитие спирогиры нередко приурочено к местам с повышенной концентрацией биогенных элементов, связанной, в том числе, и со сбросом недостаточно очищенных сточных вод. С другой стороны, широкое распространение спирогиры отмечено и в олиготрофных озерах антарктической климатической зоны [13] и в термальных источниках Южной Африки (провинция Лимпопо) с очень низким содержанием нитратов и фосфатов [14].

Распространение водорослей *Spirogyra* sp., нередко образующих в водоемах сплошной покров, сопровождается снижением интенсивности света в водной среде, уменьшением содержания биогенных элементов и кислорода [15], а также выделением обнаруженных в *Spirogyra* sp. альгицидных таниноподобных дубильных веществ [16]. При массовом развитии спирогиры отмечены снижение темпов роста и интенсивности дыхания многих видов макрофитов, сокращение видового разнообразия подводных сообществ [17].

Одним из факторов, способствующих широкому распространению в литорали оз. Байкал водорослей рода *Spirogyra*, может быть значительный рост концентрации биогенных макро- и микроэлементов, поступающих в прибрежные воды с поверхностным стоком с водосборной территории озера. Возросший поток химических элементов с загрязненными поверхностными и подземными водами, в результате гидродинамических, физико-химических и биологических процессов в байкальской воде снижается до фонового уровня [8]. Максимум информации о загрязнении водной среды дает уровень концентрации химических элементов в талломах водорослей [19].

Задача исследований – определить концентрацию химических элементов в составе спирогиры и зеленых водорослей, доминировавших до недавнего времени в литорали залива (*Ulothrix zonata*, *Tetraspora cylindrica* var. *bullosa*, *Draparnaldia baicalensis*). Для оценки изменения качества водной среды выявить особенности элементного состава *Spirogyra* sp.

#### Объекты и методы исследования

Отбор проб водорослей, органоминеральной взвеси, осевшей в их зарослях, проб воды и донных грунтов проводили в 2011, 2012, 2016 гг. в пределах залива Лиственничного, в береговой зоне которого по долинам рек и вдоль побережья расположен пос. Листвянка. В 2013 г. образцы донных грунтов отбирали в районе пос. Максимиха (восточный берег, Баргузинский залив) на участках, прилегающих к песчаным пляжам без скоплений и с мощными

скоплениями отмершей спирогиры. Водоросли *T. cylindrica* в мелководной зоне залива Лиственничного не были найдены и собраны в 2014 г. в литорали бух. Бол. Коты.

Пробы речной воды отбирали в устье рек Каменушки, Крестовки, Мал. Черемшанки, Бол. Черемшанки в 5–6 м до впадения в залив Лиственничный и в русле этих же рек, выше территории поселка. Пробы байкальской воды (1–6 м от уреза) и интерстициальной воды из лунок на пляжах зоны заплеска отбирали в нескольких метрах и в 20–30 метрах от мест впадения рек.

После отбора талломы водорослей, не отделяя от каменного субстрата, промывали в прибрежной воде. Так же, не отделяя от каменного субстрата, отмывали их от мелкодисперсных загрязнений в пластиковых емкостях с байкальской фильтрованной водой. Отмытые водоросли снимали с камней, просматривали под биноклем МБС-10 для удаления остатков загрязнений, ополаскивали дистиллированной водой и доводили до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при 60°C, до постоянной массы – при 105°C. Культивированную спирогиру отмывали в фильтрованной байкальской воде, ополаскивали дистиллированной водой и сушили при 60 и 105°C. Для культивирования спирогиры использовали агаризированную (1,5%) и жидкую основную среду Болда [20]. Подготовку проб водорослей к анализу выполняли способом кислотной минерализации (70%-ной HNO<sub>3</sub>, 30%-ным H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) [21].

Из образцов донного грунта, а также из массы мелкодисперсных органоминеральных частиц, вымытых из водорослей, ситовым методом выделяли гранулометрическую фракцию < 0,25 мм и методом квартования составляли средние пробы. Усредненные пробы из частиц < 0,25 мм, сушили при 105°C до постоянного веса и использовали для лимоннокислых (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>, pH 5,5) вытяжек подвижных соединений макро- и микроэлементов [22]. Для экстракции в полипропиленовые емкости с навесками проб приливали экстрагент в соотношении 1:10, встряхивали три часа, отбирали 14 мл суспензии и фильтровали через мембранные фильтры из ацетата целлюлозы с диаметром пор 0,2 мкм в полипропиленовые пробирки.

Пробы поверхностного стока талых вод, воды прибрежной зоны, интерстициальной воды из лунок на пляжах, речной воды в устьях и выше территории поселка, отбирали пластиковыми шприцами, фильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм в 15 мл полипропиленовые пробирки. В качестве консерванта использовали дважды очищенную 70% азотную кислоту.

Элементный состав всех проб определяли методом ИСП-МС. Анализ выполняли на масс-спектрометре Agilent 7500se фирмы Agilent Technologies с квадрупольным масс-анализатором в Центре коллективного пользования “Ультрамикроанализ” при ЛИН 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].

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. Величина этого отношения характеризует степень концентрирования элемента в живом организме относительно среды обитания. Содержание воды и золы 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.

### Результаты исследований и обсуждение

В период массовой вегетации аккумуляция химических элементов в талломах исследуемых водорослей приводит, наряду с физико-химическими факторами, к резкому уменьшению интенсивности миграции химических элементов и вносит свой вклад в обеспечение стабильности и постоянства элементного состава воды прибрежной зоны. Существенность этого вклада обусловлена достаточно высокой фитомассой бентосных водорослей (см. табл. 1). Фитомасса спирогиры в заливе Лиственничный при 100% проективном покрытии составляла осенью 2012 г. 170–460 г/м<sup>2</sup> [24].

Содержание воды в исследованных водорослях – 82–96%. Зольность водорослей не превышает 4–8% сухой массы. По усредненным данным наибольшая суммарная концентрация химических элементов характерна для талломов *Spirogyra* sp. (~ 58000 мкг/г сухой массы) и *D. baicalensis* (~ 45000 мкг/г сухой массы). Эта величина примерно в 2 раза меньше в *U. zonata* и примерно в 5 раз меньше в *T. cylindrica*.

Из определяемых элементов в составе *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica* преобладают Ca, Mg, P, S, K (табл. 2). По содержанию кальция и фосфора водоросли, включая спирогиру, мало отличаются друг от друга. Магний, калий и рубидий в наибольшей степени накапливаются в *D. baicalensis*. *U. zonata* выделяется самым высоким содержанием серы и низким – калия и натрия. *Spirogyra* sp. значительно превосходит другие водоросли по содержанию натрия, хлора и целого ряда микроэлементов – Li, Al, Si, Mn, Co, Zn, Y, I, Ba, Pb, редкоземельных элементов (РЗЭ). Наиболее яркая особенность элементного состава спирогиры – очень высокое содержание Ba, не характерное в большинстве случаев ни для пресноводных или морских организмов [25], [26], ни для организмов суши [26], [27]. Спирогира, выращенная в условиях лаборатории на питательной среде [20], содержала его в 5–25 раз больше, чем *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica*, собранные в заливе Лиственничном и заметно превосходила их по количеству Li, Na, Cl, Mn, Co, Zn, РЗЭ (табл. 2). Содержание Cu, As, Sr, Cd, W, Hg, Bi, U в составе исследуемых водорослей, за исключением культивированной спирогиры, находилось примерно на одном уровне.

По данным табл. 2 для элементов с концентрацией от > 10000 до 10 мкг/г сухой массы можно построить следующие ряды: *U. zonata* – S (>10000) > Ca > Mg (>1000) > P > Cl > Fe ≥ K > Si (>1000) > Na ≥ Sr, Al, Mn > Zn ≥ Ba (>1000);  
– *D. baicalensis* – K (>10000) > Mg > Ca > S > P ≥ Cl (>1000) > Na > Si (>1000) > Fe > Sr > Zn > Mn (>1000);  
– *T. cylindrica* – Ca > P > Mg ≥ K, S (>1000) > Na ≥ Si (>1000) > Fe (>1000) > Cl > Al ≥ Ba ≥ Sr > Mn (>1000);  
– *Spirogyra* sp. – Na (>10000) > Ca > S ≥ K ≥ Ba > Mg > Cl > P > Mn (>1000) > Si > Fe > Al > Zn (>1000) > Sr (>1000 мкг/г сухой массы).

Таблица 2 – Среднее содержание ( $\pm$  стандартное отклонение) химических элементов в воде (мкг/л) и водорослях (мкг/г сухой массы) мелководной зоны залива Лиственничного

Элемент	Пос. Листвянка			Пос. Бол. Коты	Пос. Листвянка	Лабораторная*
	25.05–28.08. 16.	28.07.16.		16.07.2014	28.07., 09.16.	09.11.16.
	Пробы воды, 1–6 м от уреза	<i>U. zonata</i>	<i>D. baicalensis</i>	<i>T. cylindrica</i>	<i>Spirogyra</i> sp.	<i>Spirogyra</i> sp.
	n=14	n=3	n=3	n=10	n=6	n=1
Li	2,07 $\pm$ 0,14	0,067 $\pm$ 0,006	0,29 $\pm$ 0,05	0,095 $\pm$ 0,035	5,48 $\pm$ 1,56	0,60
B	5,69 $\pm$ 0,42	0,48 $\pm$ 0,12	1,09 $\pm$ 0,39	5,85 $\pm$ 0,93	1,51 $\pm$ 0,34	9,70
Na	3600 $\pm$ 200	67,0 $\pm$ 34,6	520 $\pm$ 60	160 $\pm$ 60	13500 $\pm$ 1700	12600
Mg	3200 $\pm$ 200	1700 $\pm$ 300	8350 $\pm$ 1170	1400 $\pm$ 80	4160 $\pm$ 1100	10100
Al	7,27 $\pm$ 2,36	49,3 $\pm$ 16,8	8,62 $\pm$ 3,01	41,8 $\pm$ 20,2	330 $\pm$ 10	52,0
Si	600 $\pm$ 100	150 $\pm$ 25	130 $\pm$ 40	140 $\pm$ 20	750 $\pm$ 20	310
P	<70	890 $\pm$ 180	1630 $\pm$ 210	1900 $\pm$ 170	1380 $\pm$ 130	9700
S	2000 $\pm$ 600	14800 $\pm$ 350	4070 $\pm$ 660	1160 $\pm$ 70	6880 $\pm$ 500	3700
Cl	1600 $\pm$ 200	400 $\pm$ 80	1500 $\pm$ 500	90,3 $\pm$ 19,2	3400 $\pm$ 600	1900
K	900 $\pm$ 60	240 $\pm$ 10	20500 $\pm$ 6500	1180 $\pm$ 500	6500 $\pm$ 200	9300
Ca	14650 $\pm$ 700	7800 $\pm$ 1150	7930 $\pm$ 1250	4100 $\pm$ 430	9000 $\pm$ 850	12700
Mn	0,90 $\pm$ 0,38	35,3 $\pm$ 6,0	12,3 $\pm$ 2,6	18,6 $\pm$ 1,7	1150 $\pm$ 120	2300
Fe	58,3 $\pm$ 14,3	260 $\pm$ 80	82,9 $\pm$ 21,4	99,5 $\pm$ 9,8	560 $\pm$ 40	220
Co	0,044 $\pm$ 0,008	0,33 $\pm$ 0,05	0,53 $\pm$ 0,04	0,75 $\pm$ 0,07	4,10 $\pm$ 0,65	52,0
Ni	0,23 $\pm$ 0,06	1,67 $\pm$ 0,29	1,67 $\pm$ 0,37	5,80 $\pm$ 1,15	6,03 $\pm$ 1,9	0,30
Cu	0,71 $\pm$ 0,25	6,50 $\pm$ 1,05	6,22 $\pm$ 1,36	9,25 $\pm$ 1,50	9,63 $\pm$ 3,20	120
Zn	1,77 $\pm$ 0,80	23,3 $\pm$ 3,5	19,1 $\pm$ 1,2	5,88 $\pm$ 0,24	130 $\pm$ 60	590
As	0,37 $\pm$ 0,04	2,83 $\pm$ 0,35	5,66 $\pm$ 1,50	6,75 $\pm$ 0,81	6,38 $\pm$ 0,90	2,20
Rb	0,58 $\pm$ 0,04	0,26 $\pm$ 0,01	7,30 $\pm$ 1,30	0,42 $\pm$ 0,18	1,40 $\pm$ 0,18	0,30
Sr	100 $\pm$ 10	58,3 $\pm$ 9,5	52,4 $\pm$ 8,0	30,5 $\pm$ 2,6	71,3 $\pm$ 6,8	7,90
Y	0,011 $\pm$ 0,004	0,13 $\pm$ 0,03	0,016 $\pm$ 0,007	0,078 $\pm$ 0,022	0,40 $\pm$ 0,01	0,035
Mo	1,23 $\pm$ 0,005	0,074 $\pm$ 0,031	0,53 $\pm$ 0,11	0,18 $\pm$ 0,07	0,68 $\pm$ 0,07	77,0
Cd	0,010 $\pm$ 0,003	0,42 $\pm$ 0,07	0,18 $\pm$ 0,07	0,24 $\pm$ 0,07	0,32 $\pm$ 0,06	0,17
Sn	0,031 $\pm$ 0,012	0,097 $\pm$ 0,031	0,015 $\pm$ 0,006	0,029 $\pm$ 0,003	0,16 $\pm$ 0,06	0,039
Sb	0,052 $\pm$ 0,005	0,025 $\pm$ 0,013	0,008 $\pm$ 0,002	0,012 $\pm$ 0,009	0,028 $\pm$ 0,019	0,009
I	1,57 $\pm$ 0,10	0,47 $\pm$ 0,12	0,63 $\pm$ 0,19	0,38 $\pm$ 0,07	4,10 $\pm$ 0,41	0,45
Ba	10,2 $\pm$ 0,3	22,3 $\pm$ 2,5	7,59 $\pm$ 1,13	39,3 $\pm$ 2,6	6000 $\pm$ 650	190
$\Sigma$ PЗЭ	0,055 $\pm$ 0,021	1,57 $\pm$ 0,20	0,09 $\pm$ 0,01	0,90 $\pm$ 0,21	2,91 $\pm$ 0,25	3,58
W	0,045 $\pm$ 0,001	0,012 $\pm$ 0,002	0,059 $\pm$ 0,017	0,031 $\pm$ 0,007	0,035 $\pm$ 0,003	0,030
Hg	0,0031 $\pm$ 0,003	0,025 $\pm$ 0,006	0,014 $\pm$ 0,004	0,009 $\pm$ 0,001	0,030 $\pm$ 0,003	0,23
Tl	0,021 $\pm$ 0,003	0,018 $\pm$ 0,002	0,007 $\pm$ 0,0021	0,002 $\pm$ 0,001	0,029 $\pm$ 0,004	0,001
Pb	0,044 $\pm$ 0,007	1,32 $\pm$ 0,15	0,23 $\pm$ 0,04	0,20 $\pm$ 0,04	5,94 $\pm$ 0,46	0,64
Bi	0,003 $\pm$ 0,001	0,006 $\pm$ 0,001	0,003 $\pm$ 0,001	0,0022 $\pm$ 0,0001	0,008 $\pm$ 0,001	0,0082
Th	0,19 $\pm$ 0,03	0,24 $\pm$ 0,03	0,002 $\pm$ 0,001	0,026 $\pm$ 0,008	0,17 $\pm$ 0,01	0,0042
U	0,56 $\pm$ 0,06	0,29 $\pm$ 0,06	0,26 $\pm$ 0,04	0,61 $\pm$ 0,04	0,41 $\pm$ 0,15	0,0078

Примечание. \* – *Спирогира*, выращенная в лаборатории на питательной среде [20]; n – число проб.

Очевидно, активный рост и широкое распространение спирогиры в заливе не могли не сопровождаться дополнительным притоком в прибрежные воды макро- и микроэлементов, преобладающих в ее химическом составе. Установлено, что в поверхностном стоке талых вод по сравнению с прибрежной водой залива и интерстициальной водой зоны залеска, содержалось в 40–60 раз больше хлора, в 10–11 – натрия, в 3–5 – калия и серы, в 2–3 – фосфора и кальция, в несколько раз больше Ti, Mn, Co, Ni, Cu, As, Ba, U (рис. 1).

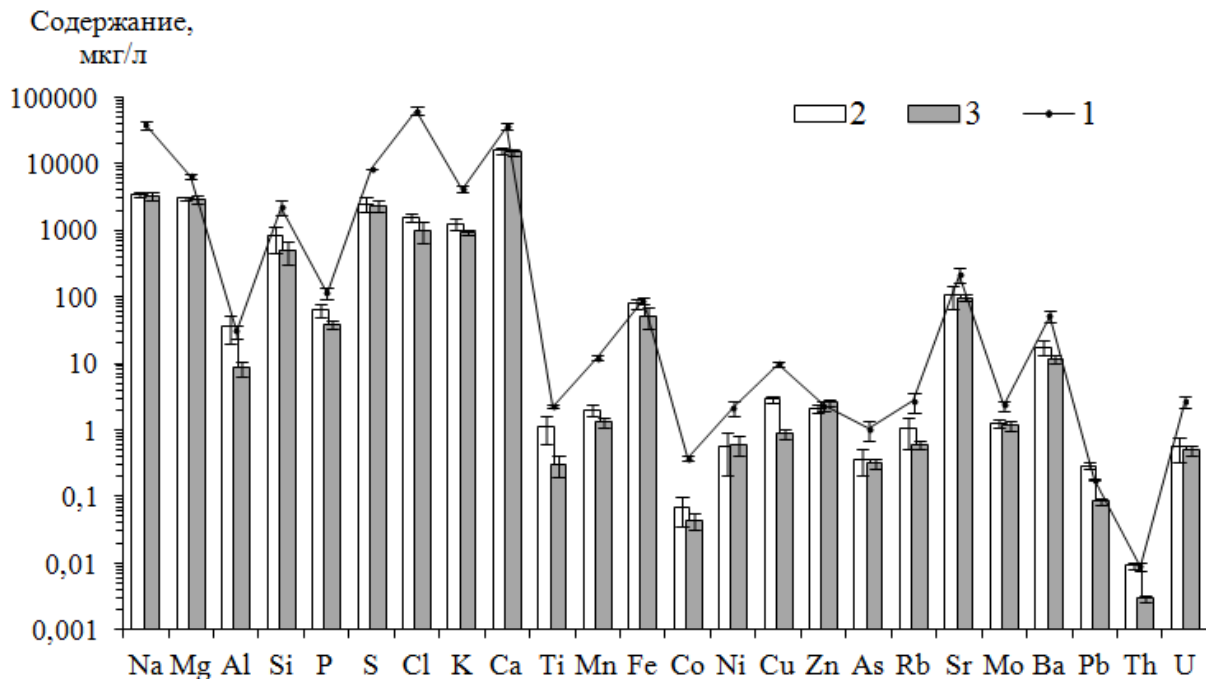


Рис.1 – Среднее содержание ( $\pm$  стандартное отклонение) химических элементов в поверхностном стоке в прибрежную зону талых вод (n=6, 18.05.2012.) – 1, в интерстициальной воде зоны заплеска (вода из лунок на пляжах, n=20, 18-25.05.2012, 2016 гг.) – 2, в воде залива Лиственничный в 1 м от уреза (n=28, 18-25.05.2012, 2016 гг.) – 3

В период с наибольшим туристическим потоком (июль – август) в воде устьев рек, впадающих в залив, по сравнению с речной водой, отобранной выше территории поселка, в 9–100 раз увеличивалась концентрация Cl, в 3–9 – K, в 2–5 – Na, P, Cu и Ba, в 3–8 – Rb (табл. 3). По данным [8] и в октябре все реки, кроме р. Крестовки, при прохождении через территорию поселка обогащались Na, Cl, P, Zn, Ba, Pb. Прослеживалось также влияние загрязненных хозяйственно-бытовыми стоками грунтовых вод на уровень содержания в водной среде литорали залива Cl, Mn, Ba, Zn, Pb [8].

Таблица 3 – Содержание химических элементов в воде рек (мкг/л), впадающих в залив Лиственничный. Отбор проб речной воды выше территории поселка (1), в устьях рек (2) и воды залива в 1 м от уреза (3) 29.07.2016

Элемент	р. Крестовка		р. Каменушка		р. Бол. Черемшанка			р. Мал. Черемшанка		
	1	2	1	2	1	2	3	1	2	3
	(n=2)									
Na	2000	3450	3000	7400	2600	7600	3550	3550	18350	4650
Mg	2100	2900	2650	12150	5000	10950	3250	4200	9150	3650
P	<70	<70	70	160	<70	95,0	<70	70	190	70
S	4550	4450	4150	5550	5900	7850	2500	4450	8200	2850
Cl	120	1100	180	5400	410	13900	1140	280	31500	3300
K	310	440	360	2350	935	3200	970	315	2850	1090
Ca	34000	9300	8600	32500	22000	36500	15150	17650	29000	16000
Mn	1,10	6,85	13,8	6,15	1,35	0,90	0,57	34,0	4,30	2,40
Fe	90	170	250	110	80	90	70	280	90	80
Co	0,12	0,08	0,12	0,15	0,09	0,15	0,05	0,13	0,14	0,06
Ni	<1	<1	<1	1,15	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cu	1,53	0,92	1,03	1,75	1,14	3,4	0,95	0,98	3,60	0,98
Zn	2,20	2,90	2,25	2,90	2,05	3,75	1,93	2,40	4,00	2,50
As	0,18	0,14	0,13	0,25	0,06	0,29	0,40	0,15	0,20	0,39
Se	0,16	0,15	0,17	0,20	0,13	0,19	0,16	0,13	0,18	0,10
Br	<10	<10	<10	17,9	<10	21,5	<10	10,0	27,5	10,5
Rb	0,72	0,28	0,26	1,40	0,27	0,73	0,57	0,30	2,55	0,78
Sr	52,0	72,5	67,5	90,5	73,5	113	105	96,5	134	109
Ba	16,4	4,75	4,35	18,9	11,0	25,0	10,1	8,00	24,0	11,8

Малозаметный источник химических элементов – постоянно присутствующие в прибрежной зоне сигаретные окурки. В районе пос. Листвянки в сентябре 2011 г. с пляжа размером 200×2 м авторами [9] собрано около 5 кг окурков. Результаты анализа показали, что береговые скопления детрита (БСД) с включением сигаретных окурков отличались от БСД природного происхождения, типичных для заплесковой зоны Байкала, более высоким содержанием подвижных соединений Na, Cl, Ni, Ti, As [9]. При разложении в прибрежной зоне мощных скоплений отмершей спирогиры (пляжи в районе пос. Максимиха) донные грунты обогащались подвижными соединениями Na, Mg, S, Cl, Ca, Mn, Co, Ni, Cu, Br, Sr, I, Ba (рис. 2).

### Содержание,

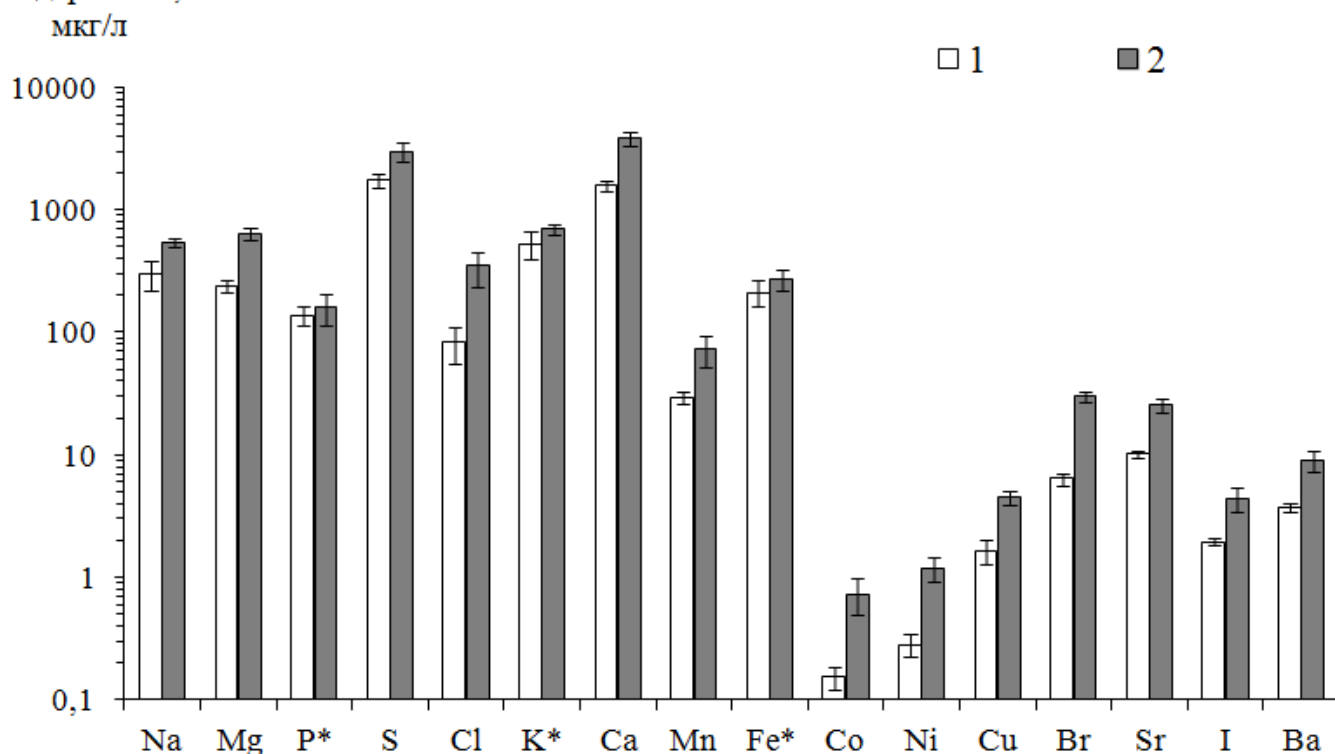


Рис. 2 – Среднее содержание ( $\pm$  стандартное отклонение) химических элементов в лимоннокислых ( $C_6H_8O_7$ , pH – 5,5) вытяжках донных грунтов (n=3), отобранных 04.06.2013., на глубине 3 м, в районе пос. Максимиха. Чистый пляж – 1, пляж со скоплением разлагающейся спирогиры – 2, \* – незначимые различия

Значительная часть химических элементов, поступавших с поверхностным стоком или в результате минерализации БСД, накапливалась в мелкодисперсных гумусированных грунтах аккумулятивных элементов рельефа зоны заплеска. Интерстициальная вода таких участков отличалась от интерстициальной воды большей части заплесковой зоны с песчано-галечниковыми грунтами повышенным содержанием B, Na, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba (табл. 4).

В качестве индикатора загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами эффективно исследование химического состава эпифитоввзвеси (тонкодисперсной взвеси, осажженной на макрофитах), обладающей высокой сорбционной способностью [28]. В органоминеральной взвеси, осевшей в зарослях исследуемых водорослей, содержалось по сравнению с донными отложениями примерно в 9–25 раз больше Cl, K, Mn, Ba, в несколько раз больше Zn, Ni, Na, B, Mg, Sr, Cd, Ca, Co, входящих в состав подвижных соединений (табл. 4).

Таблица 4 – Содержание химических элементов (мкг/л) в интерстициальной воде зоны заплеска (1 – песчано-галечниковый грунт, 2 – гумусированный грунт темно-серой окраски), в лимоннокислых вытяжках донных грунтов (3) и эпифитоввзвеси (4), собранной в зарослях бентосных водорослей (усредненная проба)

Элемент	09.11.2011, 19.10.2012.		28.07.16.	
	Интерстициальная вода из лунок, заложенных на пляжах		Вытяжки донных грунтов и эпифитоввзвеси раствором лимонной кислоты	
	1 (n=6)	2 (n=1)	3 (n=11)	4 (n=1)
B	6,54±2,05	47,0	4,01±2,63	15,0
Na	3340±180	20000	420±120	1660
Mg	3040±240	15400	440±160	1570
Al	38,4±14,9	51,0	65,3±28,3	13,8
Si	690±200	4500	530±150	670
P	59,0±12,2	95,0	41,8±21,1	108

Продолжение Таблицы 4

Элемент	09.11.2011, 19.10.2012.	19.10.12.	28.07.16.	
	Интерстициальная вода из лунок, заложённых на пляжах		Вытяжки донных грунтов и эпифитовзвеси раствором лимонной кислоты	
	1 (n=6)	2 (n=1)	3 (n=11)	4 (n=1)
S	2570±810	10600	720±160	1380
Cl	700±110	14400	79,0±33,6	2000
K	1150±180	3800	450±190	4800
Ca	16300±1970	51000	2303±840	7800
Ti	1,27±0,51	7,10	2,74±1,29	0,42
Mn	0,94±0,39	13,9	15,7±8,0	155
Fe	77,4±15,0	137	180±80	57
Co	0,061±0,018	0,28	0,47±0,26	1,43
Ni	0,58±0,39	4,20	0,99±0,50	4,10
Cu	1,24±0,71	4,20	9,19±4,53	15,5
Zn	1,47±0,37	4,50	1,84±1,06	13,2
Br	9,7±2,4	24,0	11,6±8,3	31,0
Rb	0,99±0,60	1,89	0,51±0,15	0,92
Sr	90±20	260	15,1±6,7	53,0
Cd	0,026±0,004	0,14	0,013±0,004	0,046
I	2,22±0,72	1,64	1,57±0,74	3,30
Ba	15,7±4,3	60	6,06±2,82	56,0
∑PЗЭ	0,25±0,11	0,67	0,75±0,32	1,56
Pb	0,29±0,33	0,47	0,80±0,36	1,73
Th	0,004±0,001	0,020	0,025±0,014	0,051
U	0,63±0,17	1,08	0,62±0,32	0,13

Изменения в химическом составе водной среды, обусловленные возросшим потоком этих элементов, особенно Na, Cl, Mn, Ba, не могли не способствовать росту и распространению водорослей *Spirogyra* sp., которые в десятки раз превосходят *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica* по степени концентрирования относительно воды Li, Na, Mn, примерно в 150–800 раз – Ba, в несколько раз – Cl, Al, Fe, Co, Zn, Mo, PЗЭ, Pb (табл. 5).

Таблица 5 – Коэффициенты биологического накопления (КБН) в водорослях относительно водной среды

Элемент	КБН			
	<i>U. zonata</i>	<i>D. baicalensis</i>	<i>T. cylindrica</i>	<i>Spirogyra</i> sp,
Li	3,2	13,9	4,6	260
B	8,4	19,1	100	26,6
Na	1,9	14,5	4,4	380
Mg	54,1	260	44,4	130
Al	680	1120	580	4520
Si	24,9	21,9	22,9	123
P	2460	4530	5330	3820
S	730	200	56,9	340
Cl	24,5	100	5,5	210
K	25,3	2190	130	690
Ca	53,2	54,1	28,0	61,4
Mn	3920	1360	2060	127400
Fe	450	140	170	960
Co	740	1190	1700	9320

Продолжение Таблицы 5

Эле- мент	КБН			
	<i>U. zonata</i>	<i>D. baicalensis</i>	<i>T. cylindrica</i>	<i>Spirogyra</i> sp,
Ni	740	740	2580	2680
Cu	920	880	1310	1360
Zn	1320	1080	330	7330
Rb	45,6	1264	72,3	240
Sr	55,6	50,0	29,1	67,9
Y	1200	150	700	3580
Mo	6,1	43,3	14,9	55,0
Cd	4340	1830	2490	3230
Sn	320	48,0	94,8	530
Sb	48,6	15,7	23,3	53,3
I	29,9	39,8	24,0	260
Ba	220	74,1	380	58590
∑PЗЭ	2850	160	1630	5270
W	26,8	132	69,2	78,2
Hg	810	440	280	970
Tl	84,2	31,5	9,1	137
Pb	2970	520	460	13380
Bi	190	80,8	63,3	240
Th	120	11,0	13,3	90
U	51,9	46,7	110	70

*Spirogyra* sp. поглощает и аккумулирует примерно в 200–20–80 раз больше натрия, чем *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica*; его содержание в составе спиригиры в ~ 9–10 раз выше содержания фосфора, в ~ 3–4 – хлора, в ~ 2,0 – кальция и калия. Для жизнедеятельности *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica*, напротив, по сравнению с натрием требуется примерно в 3–10 раз больше фосфора, в 3–40–7,5 – калия и в 100–15–25 раз больше кальция. В отличие от других исследуемых водорослей, в составе спиригиры содержится меньше фосфора, чем хлора, примерно равные количества никеля и кобальта; только ей требуется больше марганца, чем железа (Mn/Fe ~ 2,0) и примерно в 80 раз больше бария, чем стронция (см. табл. 2). Спиригира в большей степени аккумулирует химические элементы, уровень содержания которых в поверхностном стоке талых и речных вод после прохождения территории поселка, отличается максимальным ростом (см. табл. 3, рис. 1) и заметно меньшим содержанием и слабой степенью накопления в составе *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica* (см. табл. 2, 5). По мнению [29] накопление биомассы спиригиры будет снижаться при уменьшении уровня в водной среде катионов натрия, калия, магния, кальция, и в первую очередь натрия, концентрация которого в составе этого гидробионта выше содержания других катионов.

#### Заключение

В результате чрезмерной антропогенной нагрузки количество вещества, поступающего в прибрежные воды залива, превысило емкость биогеохимического барьера мелководной зоны, основными компонентами которого, наряду с байкальскими губками, являлись растительные пояса улотрикса, тетраспоры, драпарнальдий с комплексом эпифитов, макро-, мейобентоса, микроорганизмов, с осевшей тонкодисперсной взвесью.

Изменение структуры донных фитоценозов в большой степени связано с возросшим потоком химических элементов в прибрежные воды залива Лиственничного, особенно Na, Cl, Mn, Zn, Ba, Pb, которые в наибольшей степени концентрируют виды рода *Spirogyra*. В значительно меньшем количестве эти элементы поглощают и аккумулируют *U. zonata*, *D. baicalensis*, *T. cylindrica*.

Как следует из литературных источников [30] и наших результатов интенсивное развитие видов рода спиригира явилось, в первую очередь, следствием антропогенной нагрузки на озеро, а сами водоросли служат биофильтром, который способствует снижению содержания в воде водоемов загрязняющих веществ. Кроме того, было показано [30], что биофильтр из спиригиры является удобным и дешевым средством, которое снижает на 100% содержание в воде *Escherichia coli*, на 30±13% – содержание нитратов и на 23±5% – фосфатов.

#### Список литературы / References

1. Мейер К. И. Введение во флору водорослей озера Байкал / К. И. Мейер // Бюл. МОИП. Отд. биологии. М. – 1930. – Т. 39(3–4). – С. 201–243.
2. Ижболдина Л. А. Мейо- и макрофитобентос озера Байкал (водоросли) / Л. А. Ижболдина. – Иркутск : Издательство Иркутского Университета, 1990. – 176 с.
3. Кожов М. М. Животный мир озера Байкал / М. М. Кожов. – Иркутск. – 1947. – 303 с.
4. Кожов М. М. Биология озера Байкал / М. М. Кожов. – М. – 1962. – 315 с.



5. Ижболдина Л. А. Экологические исследования Байкала и Байкальского региона. В 2 ч. Ч.1. Результаты исследований бентоса Байкала / Л. А. Ижболдина. – Иркутск : Издательство Иркутского университета, 1992. – С. 137–151.
6. Кравцова Л. С. Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в прибрежной части залива Лиственничный озера Байкал / Л. С. Кравцова, Л. А. Ижболдина, И. В. Ханаев и др. // Докл. РАН. – 2012. – Т. 447(2). – С. 227–229.
7. Ижболдина Л. А. Атлас и определитель водорослей бентоса и перифитона озера Байкал (мейо-, макрофиты) с краткими очерками по их экологии / Л. А. Ижболдина. – Новосибирск : Наука-Центр, 2007. – 248 с
8. Сутурин А. Н. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали / А. Н. Сутурин, Е. П. Чебыкин, В. В. Мальник и др. // География и природные ресурсы. – 2016. – № 6. – С. 43–54.
9. Потапская Н. В. Оценка накопления отходов потребления в прибрежной зоне озера Байкал и дельте реки Селенги / Н. В. Потапская, Н. Н. Куликова, О. А. Тимошкин и др. // География и природные ресурсы. – 2016. – № 1. – С. 62–69.
10. Тимошкин О. А. Водный шелк / О. А. Тимошкин // Наука Приангарья. – 2013. – Т. 3(7). – С. 8–9.
11. Волкова Е. А. Загадки байкальской спирогиры / Е. А. Волкова // Наука из первых рук. – 2016. – Т. 68(2). – С. 20–29.
12. Derlet R. W. Impact of summer cattle grazing on the Sierra Nevada watershed: aquatic algae and bacteria [Electronic resource] / R. W. Derlet, J. R. Richards, L. L. Tanaka et al // J. Environmental and Public Health. – 2012. – Vol. 2012, Article ID760108. – 7 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/760108> (accessed: 30.01.2017)
13. Hawes I. The Seasonal Dynamics of *Spirogyra* in a Shallow, Maritime Antarctic Lake / I. Hawes // Polar Biol. – 1988. – Vol. 8. – P. 429–437.
14. Jonker C. Z. Association between physical and geochemical characteristics of thermal springs and algal diversity in Limpopo Province, South Africa / C. Z. Jonker, C. van Ginkel, J. Olivier // Water SA. – 2013. – V. 39(1). – P. 95–104.
15. Dong Bi-Cheng. Effects of *Spirogyra arcta* on biomass and structure of submerged macrophyte communities / Dong Bi-Cheng, Liu Rui-Hua, Yu Fei-Hai // Plant species biology. – 2015. Vol. 30(1). – P. 28–36.
16. Nishizawa M. Gallotannins of the freshwater green alga *Spirogyra* sp. / M. Nishizawa, T. Yamagishi, G. Nonaka et al // Phytochemistry. – 1985. – Vol. 24. – P. 2411–2413.
17. Hofstra D. Competitive performance of *Hydrilla verticillata* in New Zealand / D. Hofstra, J. Clayton, J. Green et al // Aquatic Botany. – 1999. – Vol. 63. – P. 305–324.
18. Hansel-Welch N. Changes in macrophyte community structure in Lake Christina (Minnesota), a large shallow lake, following biomanipulation / N. Hansel-Welch, M. G. Butler, T. J. Carlson, M. A. Hanson // Aquatic Botany. – 2003. – Vol. 75. – P. 323–337.
19. Rajfur M. Use of algae in active biomonitoring of surface waters / M. Rajfur, A. Kłos // Ecol Chem Eng S. – 2014. – Vol. 21(4). – P. 561–576.
20. Nichols H. W. *Trichosarcina polymorpha* gen. et sp. nov. / H. W. Nichols, H. C. Bold // J. Phycologia. – 1965. – Vol. 1. – P. 34–38.
21. Сайбаталова Е. В. Влияние способов пробоподготовки на результаты определения элементного состава пресноводных губок методом ИСП-МС / Е. В. Сайбаталова, Н. Н. Куликова, А. Н. Сутурин и др. // Журн. аналит. химии. – 2010. – Т. 65(7). – С. 691–698.
22. Сутурин А. Н. Извлечение химических элементов из горных пород байкальской водой и органическими соединениями / А. Н. Сутурин, Н. Н. Куликова, С. М. Бойко и др. // Геохимия. – 2013. – № 5. – С. 471–480.
23. Suturin A. N. Preparation and assessment of a candidate reference sample of lake BAIKAL deep water / A. N. Suturin, L. F. Paradina, V. N. Erov et al // Spectrochimica Acta. Part B. 2003. – Vol. 58. – P. 277–288.
24. Тимошкин О. А. Массовое развитие зелёных нитчатых водорослей родов *Spirogyra* Link и *Stigeoclonium* Kutz. (CHLOROPHYTA) в прибрежной зоне Южного Байкала / О. А. Тимошкин, Н. А. Бондаренко, Е. А. Волкова и др. // Гидробиологический журнал. – 2014. – № 5. – С. 15–26.
25. Виноградов А. П. Химический элементарный состав организмов моря. Избр. Тр. / А. П. Виноградов. – М. : Наука, 2001. – 620 с.
26. Войткевич Г. В. Справочник по геохимии / Г. В. Войткевич, А. В. Кокин, А. Е. Мирошников и др. – М. : Недра, 1990. – 480 с.
27. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях. Пер. с англ. / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 439 с.
28. Янин Е. П. Эпифитовзвесь – новый индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами / Е. П. Янин. – М. : ИМГРЭ, 2002 – 51 с.
29. Мартемьянов И. В. Пороговые концентрации катионов во внешней среде, определяющие границы выживания нитчатой водоросли *Spirogyra* sp. в пресных водоемах / И. В. Мартемьянов, А. С. Маврин // Сибирский экологический журнал. – 2012. – № 3. – С. 345–350.
30. Barnard M. A. Utilizing *Spirogyra grevilleana* as a phytoremediatory agent for reduction of limnetic nutrients and *Escherichia coli* concentrations / M. A. Barnard, J. Porter W., S. B. Wilde // American journal of plant sciences. – 2017. – Vol. 8. – P. 1148–1158.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Mejer K. I. Vvedenie vo floru vodoroslej ozera Bajkal [Introduction to the flora of algae of Lake Baikal] / K. I. Mejer // Vjul. MOIP. Otd. Biologii [Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Biological series]. М. – 1930. – Vol. 39(3–4). – P. 201–243. [in Russian]
2. Izhboldina L. A. Mejo- i makrofitobentos ozera Bajkal (vodorosli) [Mayo- and macrophytobenthos of Lake Baikal (algae)] / L. A. Izhboldina. – Irkutsk : Izdatel'stvo Irkutskogo universiteta, 1990. – 176 p. [in Russian]

3. Kozhov M. M. Zhivotnyj mir ozera Bajkal [Animal World of Lake Baikal] / M. M. Kozhov. – Irkutsk. – 1947. – 303 p. [in Russian]
4. Kozhov M. M. Biologija ozera Bajkal [Biology of Lake Baikal] / M. M. Kozhov. – M. – 1962. – 315 p. [in Russian]
5. Izhboldina L. A. Jekologicheskie issledovanija Bajkala i Bajkal'skogo regiona V 2 ch. Ch.1. Rezul'taty issledovanij bentosa Bajkala [Ecological research of Baikal and Baikal region. In the 2 h P. 2. The results of studies of the benthos of Baikal] / L. A. Izhboldina. – Irkutsk : Izdatel'stvo Irkutskogo universiteta, 1992. – P. 137–151. [in Russian]
6. Kravcova L. S. Narushenie vertikal'noj zonal'nosti zelenyh vodoroslej v pribrezhnoj chasti zaliva Listvennichnyj ozera Bajkal [Violation of the vertical zonality of green algae in the coastal part of the Larch Bay of Lake Baikal] / L. S. Kravcova, L. A. Izhboldina, I. V. Hanaev and others // Dokl. RAN [Dokl. RAS]. – 2012. – Vol. 447(2). – P. 227–229. [in Russian]
7. Izhboldina L. A. Atlas i opredelitel' vodoroslej bentosa i perifitona ozera Bajkal (mejo-, makrofity) s kratkimi ocherkami po ih jekologii [Atlas and determinant of algae of benthos and periphyton of Lake Baikal (meyo-, macrophytes) with short essays on their ecology] / L. A. Izhboldina. – Novosibirsk : Nauka-Centr, 2007. – 248 p. [in Russian]
8. Suturin A. N. Rol' antropogennyh faktorov v razvitii jekologicheskogo stressa v litorali [The role of anthropogenic factors in the development of environmental stress in the littoral] / A. N. Suturin, E. P. Chebykin, V. V. Mal'nik and others // Geografija i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]. – 2016. – No. 6. – P. 43–54. [in Russian]
9. Potap'skaja N. V. Ocenka nakoplenija othodov potreblenija v pribrezhnoj zone ozera Bajkal i del'te reki Selengi [Estimation of the accumulation of consumption wastes in the coastal zone of Lake Baikal and the delta of the Selenga River] / N. V. Potap'skaja, N. N. Kulikova, O. A. Timoshkin and others // Geografija i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]. – 2016. – No. 1. – P. 62–69. [in Russian]
10. Timoshkin O. A. Vodnyj shelk [Water silk] / O. A. Timoshkin // Nauka Priangar'ja [Science of the Angara region]. – 2013. – Vol. 3(7). – P. 8–9.
11. Volkova E. A. Zagadki bajkal'skoj spirogiry [Mysteries of the Baikal Spirogira] / E. A. Volkova // Nauka iz pervyh ruk [Science from First-Hand] – 2016. – Vol. 68(2). – P. 20–29. [in Russian]
12. Derlet R. W. Impact of summer cattle grazing on the Sierra Nevada watershed: aquatic algae and bacteria [Elektronik resource] / R. W. Derlet, J. R. Richards, L. L. Tanaka et al // J. Environmental and Public Health. – 2012. – V. 2012, Article ID760108. – 7 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/760108> (accessed: 30.01.2017)
13. Hawes I. The Seasonal Dynamics of *Spirogyra* in a Shallow, Maritime Antarctic Lake / I. Hawes // Polar Biol. – 1988. – V. 8. – P. 429–437.
14. Jonker C. Z. Association between physical and geochemical characteristics of thermal springs and algal diversity in Limpopo Province, South Africa / C. Z. Jonker, C. van Ginkel, J. Olivier // Water SA. – 2013. – V. 39(1). – P. 95–104.
15. Dong Bi-Cheng. Effects of *Spirogyra arcta* on biomass and structure of submerged macrophyte communities / Dong Bi-Cheng, Liu Rui-Hua, Yu Fei-Hai // Plant species biology. – 2015. V. 30(1). – P. 28–36.
16. Nishizawa M. Gallotannins of the freshwater green alga *Spirogyra* sp. / M. Nishizawa, T. Yamagishi, G. Nonaka et al // Phytochemistry. – 1985. – V. 24. – P. 2411–2413.
17. Hofstra D. Competitive performance of *Hydrilla verticillata* in New Zealand / D. Hofstra, J. Clayton, J. Green et al // Aquatic Botany. – 1999. – V. 63. – P. 305–324.
18. Hansel-Welch N. Changes in macrophyte community structure in Lake Christina (Minnesota), a large shallow lake, following biomanipulation / N. Hansel-Welch, M. G. Butler, T. J. Carlson, M. A. Hanson // Aquatic Botany. – 2003. – V. 75. – P. 323–337.
19. Rajfur M. Use of algae in active biomonitoring of surface waters / M. Rajfur, A. Kłos // Ecol Chem Eng S. – 2014. – V. 21(4). – P. 561–576.
20. Nichols H. W. *Trichosarcina polymorpha* gen. et sp. nov. / H. W. Nichols, H. C. Bold // J. Phycologia. – 1965. – Vol. 1. – P. 34–38.
21. Sajbatalova E. V. Vlijanie sposobov probopodgotovki na rezul'taty opredelenija jelementnogo sostava presnovodnyh gubok metodom ISP-MS [Influence of Sample Preparation on the Determination of the Elemental Composition of Fresh Water Sponges by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry] / E. V. Sajbatalova, N. N. Kulikova, A. N. Suturin and others. // Zhurn. analit. Himii [journal of analit. Chemistry]. – 2010. – Vol. 65(7). – P. 691–698. [in Russian]
22. Suturin A. N. Izvlechenie himicheskikh jelementov iz gornyh porod bajkal'skoj vodoj i organicheskimi soedinenijami [Extraction of chemical elements from rocks by Baikal water and organic compounds] / A. N. Suturin, N. N. Kulikova, S. M. Bojko and others // Geohimija [Geochemistry]. – 2013. – No. 5. – P. 471–480.
23. Suturin A. N. Preparation and assessment of a candidate reference sample of lake BAIKAL deep water / A. N. Suturin, L. F. Paradina, V. N. Epov et al // Spectrochimica Acta. Part B. – 2003. – Vol. 58. – P. 277–288.
24. Timoshkin O. A. Massovoe razvitie zel'jonyh nitchatyh vodoroslej rodov *Spirogyra* Link i *Stigeoclonium* Kutz. (CHLOROPHYTA) v pribrezhnoj zone Juzhnogo Bajkala [Mass development of green filamentous algae of the genera *Spirogyra* Link and *Stigeoclonium* Kutz. (CHLOROPHYTA) in the coastal zone of the Southern Baikal] / O. A. Timoshkin, N. A. Bondarenko, E. A. Volkova and others. // Gidrobiologicheskij zhurnal [Hydrobiological Journal]. – 2014. – No. 5. – P. 15–26. [in Russian]
25. Vinogradov A. P. Himicheskij jelementarnyj sostav organizmov morja. Izbr. Tr. [Chemical Elementary Composition of Sea Organisms. Fav. Works] / A. P. Vinogradov. – M. : Nauka, 2001. – 620 p. [in Russian]
26. Vojtkevich G. V. Spravochnik po geohimii [Handbook on Geochemistry] / G. V. Vojtkevich, A. V. Kokin, A. E. Miroshnikov and others. – M. : Nedra, 1990. – 480 p. [in Russian]
27. Kabata-Pendias A. Mikrojelementy v pochvah i rastenijah. Per. s angl. [Microelements in soils and plants. Trans. with English] / A. Kabata-Pendias, H. Pendias. – M.: Mir, 1989. – 439 p. [in Russian]
28. Janin E. P. Jepifitovzves' – novyj indikator zagrjaznenija rechnyh sistem tjazhelymi metallami [A new indicator of pollution of river systems by heavy metals] / E. P. Janin. – M. : IMGRJe, 2002 – 51 p. [in Russian]

29. Martem'janov I. V. Porogovye koncentracii kationov vo vneshnej srede, opredel'jajushhie granicy vyzhivaniya nitchatoj vodorosli Spirogira sp. v presnyh vodoemah [Threshold concentrations of cations in the environment, which determine the survival limits of filamentous alga Spirogira sp. in fresh water reservoirs] / I. V. Martem'janov, A. S. Mavrin // Sibirskij jekologicheskij zhurnal [Contemporary Problems of Ecology]. – 2012. – No. 3. – P. 345–350. [in Russian]

30. Barnard M. A. Utilizing *Spirogyra grevilleana* as a phytoremediatory agent for reduction of limnetic nutrients and *Escherichia coli* concentrations / M. A. Barnard, J. Porter W., S. B. Wilde // American journal of plant sciences. – 2017. – V. 8. – P. 1148–1158.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.053>

Минаев А.В.,<sup>1</sup> Минаев В.В.,<sup>2</sup> Сутурин А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0003-1577-8440, <sup>2</sup>ORCID: 0000-0001-9760-6057,

<sup>3</sup>ORCID: 000-0002-6805-5986, кандидат геолого-минералогических наук,

ИНЦ СО РАН, ЛИН СО РАН

## ВЫЯВЛЕНИЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ЗОН СУБАКВАЛЬНОЙ РАЗГРУЗКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (АКВАТОРИЯ ПОС. ЛИСТВЯНКА)

*Аннотация*

Проведены гидрогеофизические работы, на трех участках выбранных по данным электротомографии, выполненной по линии уреза пос. Листвянка в 2015 – 16 годах. В 2017 году выполнены профили электротомографии по дну акваториальной части пос. Листвянка вблизи трех выявленных ранее зон низких сопротивлений в урезовой части исследуемой территории. Рассмотрены данные электрометрических исследований водной среды акватории оз. Байкал в районе пос. Установлена изменчивость удельного электрического сопротивления (УЭС) в различных участках дна, позволяющая выявить зоны субаквальной разгрузки антропогенно загрязненных вод, а также определены зоны выхода естественных подземных вод с низкими значениями (УЭС) относительно воды оз. Байкал.

**Ключевые слова:** электротомография, удельное электрическое сопротивление, акватория оз. Байкал.

Minaev A.V.<sup>1</sup>, Minaev V.V.<sup>2</sup>, Sutturin A.N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0003-1577-8440,

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0001-9760-6057, <sup>3</sup>ORCID: 000-0002-6805-5986, PhD in Geology and Mineralogy,

Irkutsk Scientific Center, The Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Limnological Institute, The Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

## IDENTIFICATION OF SUBAQUATIC DISCHARGE ZONES OF GROUNDWATER (WATER AREA OF LISTVYANKA) BY ELECTRO-TOMOGRAPHY METHOD

*Abstract*

A hydrogeophysical work was carried out in three sections selected according to the data of electro-tomography, performed along the boundary line of the Listvyanka settlement in 2015-2016. In 2017, profiles of electro-tomography were made along the bottom of the aquatorial part of the Listvyanka settlement near three previously identified low resistance zones in the studied area. The data of electrometric researches of water environment of water area of Baikal Lake in the area of the village are considered. The variability of the specific electrical resistance (SER) in different parts of the bottom is established, which allows to identify zones of sub-aquatic discharge of anthropogenically polluted waters, and also the zones of natural groundwater outlet with low values of SER relative to the water of Baikal lake.

**Keywords:** electro-tomography, specific electric resistance, water area of the Baikal lake.

Одной из главных причин преобразования прибрежных экосистем в акватории байкальских городов и поселков, является поступление микробиологического и химического загрязнения с речными водами. Объем и степень загрязнения последних в поселках, не имеющих систем канализации, резко возрастает. В местах субаквальной разгрузки антропогенно загрязненных вод происходит замена поясов фитобентоса на сплошные заросли спирогиры. К этим зонам, приурочены участки "цветения" воды. Выявление таких зон, разграничение участков субаквальной разгрузки с антропогенным загрязнением и без него, возможно методами электрографии.

Данных об электропроводности воды по акватории оз. Байкал в литературе немного [1-10]. Получение подобной информации необходимо для решения ряда практических задач электротомографии и геоэкологии.

В работах [2], [4], [9] показана возможность использования электротомографии и измерения удельного электрического сопротивления УЭС (сопротивление электрическому току куба горной породы со стороной равной 1 метру, единица удельного сопротивления – Ом\*м [1]) вод при геофизических, гидрологических исследованиях.

Цель проведенных гидрогеофизических исследований – определение характерных меток состояния экосистемы и выделение мест разгрузки подземных вод в акватории оз. Байкал в районе пос. Листвянка.

Экспериментальные исследования проводились методами электротомографии геофизической станцией «Скала 48» разработчик ИНГГ СО РАН со специально изготовленной модифицированной электроразведочной косой. Модификация электроразведочной косы заключается в возможности работы «косы» как по дну, так и по поверхности водоема, исключая попадание воды внутрь кабеля и как следствие, измерение значений удельного электрического сопротивления, не внутри кабеля, а снаружи на расстоянии пяти метров между разъемами для подключения электродов. Электроразведочная станция подключается не в середине между «косами», а с одного края, что обеспечивает ровную укладку профиля, но исключает работу по схеме «нагоняющего профиля». Траектория профиля и значения электрических сопротивлений показаны на (см. рис. 2–4). Предварительная обработка и инверсия данных томографии выполнялась с помощью программ «RiPPP» (ИНГГ СО РАН), «ERT Lab» и «Surfer». Ортофотоплан