


РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

 УДК 543.31.51:[675.088.3+504.45](282.256.341)

 <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-82-102>

 EDN ZWQKER

Загрязнение реки Тья и поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Северобайкальска: оценка геохимическим методом

Евгений Павлович Чебыкин¹, Наталья Николаевна Куликова², Елена Валентиновна Лихошвай³, Александр Николаевич Сутурин⁴

^{1,2,3,4} Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

¹ epcheb@yandex.ru

² kulikova@lin.irk.ru

³ likhoshway@mail.ru

⁴ san@lin.irk.ru

Аннотация. Методом ИСП-МС изучен химический элементный состав р. Тья, впадающие в нее сточные воды канализационных очистных сооружений (КОС) г. Северобайкальска и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния загрязненных речных вод. Установлено, что водный вклад сточных вод КОС г. Северобайкальска в общий речной сток р. Тья очень мал (~0,04%) вследствие большой водности самой реки, однако геохимические вклады по отдельным элементам довольно значительные (Cl – 29%, P – 7,3%, Na – 4,2%, Zn – 2,7%). Влияние загрязненных вод р. Тья на прилегающую литораль Байкала ограничено сектором 200-300 м от уреза во фронтальном направлении (водные вклады речных вод составляют 26-4%), однако в прибрежной зоне распространяется за пределы дельты. Из исследованных объектов наибольшему геохимическому влиянию сточных вод КОС г. Северобайкальска подвергается р. Тья и прибрежная вода в литорали Байкала в 550 м вправо от устья основной протоки, где водный вклад речных вод максимальный (86%). В этих объектах суммарный геохимический вклад (СГХВ) сточных вод, рассчитанный по 41 информативному химическому элементу, составляет 53 и 35% соответственно. На остальных станциях в литорали Байкала в прибрежной зоне СГХВ небольшой и составляет 2,8-7,5%. В секторе 200-300 м от уреза СГХВ сопоставим с прибрежной зоной и составляет 1,5-8,1%. В секторах 500-600 и 800 м от уреза СГХВ минимальный – 0,07-0,21%. В сточных водах КОС г. Северобайкальска обнаружено превышение нормативов по P (69 ПДК), Mn (6 ПДК), Zn (3,4 ПДК), Cu (2,1 ПДК), Mo (1,7 ПДК) и V (1,3 ПДК).

Ключевые слова: сточные воды, химические элементы, ИСП-МС, предельно допустимые концентрации, озеро Байкал

Благодарности: команде и капитану И.Ю. Бархокову НИС «Г.Ю. Верещагин» за помощь в отборе проб.

Финансирование: работа выполнена по государственному заданию ЛИИ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 121032300186-9).

Для цитирования: Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение реки Тья и поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Северобайкальска: оценка геохимическим методом // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 82-102. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-82-102>. EDN ZWQKER.

SECTION 2. POLLUTION

Original Paper

Pollution of Tyaa River and Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Severobaikalsk Town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method

Eugene P. Chebykin¹, Natalya N. Kulikova², Yelena V. Likhoshway³, Alexander N. Suturin⁴

^{1,2,3,4} Limnological Institute of RAS SB, Irkutsk, Russia

¹ epcheb@yandex.ru

² kulikova@lin.irk.ru

³ likhoshway@mail.ru

⁴ san@lin.irk.ru

Abstract. The composition of chemical elements from the Tyya River, wastewater from water treatment facilities (WTF) in Severobaikalsk town and from surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of polluted riverine waters were studied using the ICP-MS method. It is found out that water fraction of WTF waste waters from Severobaikalsk town into total riverine drainage of the Tyya R. is very low (~0.04%) due to a great water content of the river itself. However, geochemical contributions by several elements are rather considerable (Cl – 29%, P – 7,3%, Na – 4,2%, Zn – 2,7%). The influence of the Tyya R. polluted waters onto the adjacent littoral of Lake Baikal is limited by the sector of 200-300 m from water edge in frontal direction (water fractions of riverine waters are 26-4%), however, in the coastal zone it extends out of the delta. Among the studied objects, maximal geochemical effect of WTF waste waters from Severobaikalsk town concerns the Tyya R. and coastal water in Lake Baikal littoral in 550 m rightward from the mouth of main duct, where water fraction of riverine waters is maximal (86%). In these objects, Summary Geochemical Fraction (SGCF) of waste waters calculated by 41 informative chemical elements was 53 and 35%, respectively. At other stations in Lake Baikal littoral in the coastal zone, SGCF is not great – 2.8-7.5%. In the sector of 200-300 m from water edge, SGCF is comparable with the coastal zone – 1.5-8.1%. In the sectors of 500-600 and 800 m from the water edge, SGCF is minimal – 0.07-0.21%. In WTF waste waters from Severobaikalsk town, exceeding of regulations by P (69 MAC), Mn (6 MAC), Zn (3.4 MAC), Cu (2.1 MAC), Mo (1.7 MAC) and V (1.3 MAC) was detected

Keywords: waste waters, chemical elements, ICP-MS, maximal allowable concentrations, Lake Baikal

Acknowledgments: the authors thank R/V “Vereshchagin” team and captain I.Yu. Barkhokov for their help in sampling.

Funding: The study was carried out under the state assignment of Limnological Institute of SB RAS with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 121032300186-9).

For citation: Chebykin, E., Kulikova, N., Likhoshway, Y. and Sutorin, A., 2024. Pollution of Tyya River and Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Severobaikalsk Town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(2), pp. 82-102. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-82-102>. EDN ZWQKER. (in Russian)

Введение

На побережье Байкала в последние годы активно проявляется экологический кризис: в литоральной зоне бурно развиваются нитчатые водоросли рода *Spirogyra*, гибнут эндемичные байкальские губки, водные лишайники и другие гидробионты [3, 8, 11, 21]. Приуроченность интенсивных кризисных проявлений к местам хозяйственной деятельности человека и развития туристического бизнеса указывает на антропогенное влияние, которое может быть, как непосредственной причиной кризиса, так и косвенно влиять на его развитие при неблагоприятных природно-климатических условиях. В связи с этим актуален расширенный и детальный поиск неблагоприятных факторов и оценка степени их влияния на литоральную зону Байкала.

В предыдущей нашей работе [13] дан обзор литературы по некоторым неблагополучным участкам Байкальской природной территории (БПТ) и существующим методам оценки степени воздействия сточных вод различного генезиса на загрязняемые объекты. В той же работе [13] нами был предложен новый, геохимический метод, для количественной оценки водных и геохимических вкладов локальных источников загрязнения в последовательно загрязняемые водные объекты (стоки-река-озеро) на примере г. Слюдянки, р. Похабиха и прилегающей литорали оз. Байкал. Применимость данного метода обусловлена широким спектром химических элементов, определяемых методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). В последующей работе [14] данный метод получил дальнейшее развитие – был разработан численный метод расчета водных вкладов источников на примере литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г. Байкальска. Расчет водных вкладов является

первым этапом разработанного геохимического метода [13] и ведется по нескольким группам контрастных консервативных и условно консервативных химических элементов с помощью итерационных процедур, минимизирующих среднее квадратичное отклонение измеренных концентраций химических элементов в объектах смешения от расчетных. На втором этапе рассчитываются геохимические вклады от источников загрязнения в исследуемых объектах смешения с учетом возможного неконсервативного поведения химических элементов на физико-химических и биогеохимических барьерах. [13, 14]. Важное преимущество предложенного нами геохимического метода состоит в том, что он позволяет быстро, дешево и надежно определить водные вклады источников на каждом этапе смешения в любых сложных объектах на момент исследования, что невозможно сделать, опираясь на официальные справочные данные и /или при использовании традиционных методов измерения расходов воды (например, при смешении разных типов вод в литорали озера).

Побережье оз. Байкал в зоне влияния р. Тья многие годы испытывает сильный экологический стресс, проявляющийся в самом масштабном развитии нехарактерной для Байкала нитчатой водоросли рода *Spirogyra* и нарушении естественной поясности водных растений, которые прослеживаются на удалении до 20 км от устья [9, 10, 21].

р. Тья – довольно крупный приток Байкала – седьмой по водности после р. Селенга, р. В. Ангара, р. Баргузин, р. Снежная, р. Турка и р. Кичера. Ее длина составляет 120 км, площадь бассейна 2580 км², среднегодовой расход – 39,9 м³/с [1]. р. Тья впадает в оз. Байкал на его северо-западном окончании и образует дельту шириной до 2,5 км (рис. 1 / fig. 1).

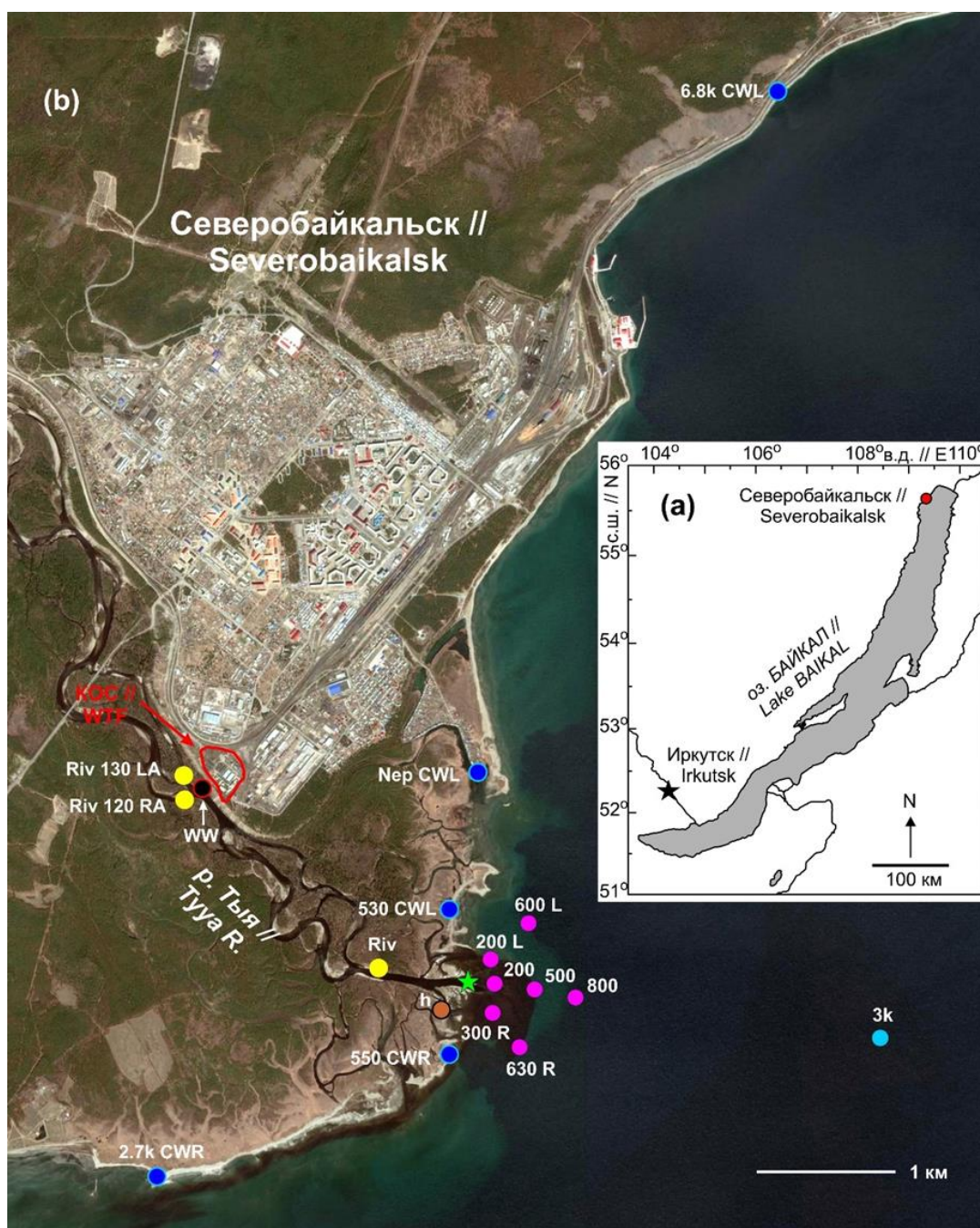


Рис. 1. Район исследования и места отбора проб: расположение района исследования относительно Байкальской природной территории (а); и места отбора проб в районе устья р. Туюя в зоне влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска (б)

* **Примечание:** В качестве подложки использован космический снимок из открытого картографического сервиса Yandex. Зеленой звездочкой показано устье основной протоки р. Туюя. Желтыми кружками отмечены места отбора речных проб (ст. Riv 130 LA и ст. Riv 120 RA – 130 и 120 м выше трубы сброса КОС, ст. Riv – 650 м выше устья основной протоки), черным – сточных вод (ст WW – труба сброса КОС 2,4 км выше устья основной протоки), синими и розовыми – прибрежная и поверхностная вода в литорали Байкала, соответственно (цифры в названии станций указывают расстояние в метрах (k – километры) от основной протоки), голубым – фоновая станция в 3 км от берега (ст. 3k).

Fig. 1. Studied areas and sampling sites: position of the studied area relative to Baikal Natural Territory (a) and sampling sites in the Tuuya River mouth area in the influence zone of WTF waste waters from Severobaikalsk town (b)

* **Note:** A satellite image from an open cartographic service Yandex is used as a mount. A green asterisk shows the mouth of main duct of the Tuuya R. Yellow circles show sites of collection of riverine samples (st. Riv 130 LA and st. Riv 120 RA – 130 and 120 m upstream the pipe of WTF discharge, st. Riv – 650 m upstream the mouth of main duct), blue and pink ones – coastal and surface water in Lake Baikal littoral, respectively (figures in station names mean distance in meters (k – kilometers) from main duct), light blue one – a background station in 3 km from the coast (st. 3k).

В р. Тья сбрасываются стоки канализационных очистных сооружений г. Северобайкальска (население 21 431 чел., 2023 г. [15]), которые, кроме городских бытовых вод принимают стоки предприятий РЖД (вагонное депо, локомотивное депо, станция очистных сооружений РЖД). Экспертиза КОС г. Северобайкальска и предприятий РЖД, проведенная в 2013 г. сотрудниками Лимнологического института СО РАН совместно с представителями Росприроднадзора и Байкальской транспортной прокуратуры установила, что сточные воды КОС характеризуются неудовлетворительными санитарно-микробиологическими и химическими показателями, значительно превышающими установленные нормативы, что свидетельствует о плохой работе очистных сооружений [10]. Установлено также, что вагонное депо города вместо обычных моющих средств для помывки железнодорожного транспорта стало использовать препараты с сильными бактерицидными веществами (полигексаметиленгуанидин – ПГМ), которые уничтожили «активный ил» городских КОС, являющийся биологическим фильтром очистки стоков от биогенных элементов (P, N). Повышенное поступление биогенов, токсикантов и других загрязнителей с неочищенными и недостаточно очищенными стоками, вероятно, является главным фактором наблюдаемого экологического стресса.

Согласно Приказу Минприроды РФ № 83 [6] в сточных водах, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон Байкальской природной территории (БПТ) нормируется содержание 35 химических элементов: Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Te, I, Cs, Ba, W, Hg и Pb. Исследования сточных вод КОС г. Северобайкальска, проведенные нами в 2013 и 2019 гг. показали, что концентрации шести элементов превышают установленные нормативы: P (69-85 ПДК), S (~ 1 ПДК), Mn (4,7-5,9 ПДК), Cu (2,2-2,9 ПДК), Zn (3,4-5,1 ПДК), Mo (1,5-1,6 ПДК), а Na и Cl близки к предельно допустимым (0,7-0,8 ПДК). Из числа рассматриваемых элементов мы исключаем ртуть ввиду ее ненадежного определения методом ИСП-МС.

Цель данного исследования – с помощью геохимического метода оценить степень влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска на р. Тья и поверхностные воды прилегающей литорали оз. Байкал – определить водные и геохимические вклады сточных и загрязненных речных вод, выявить основные контуры рассеяния загрязнителей в литорали.

1. Материалы и методы

1.1. Описание района работ, отбор и фиксация проб. г. Северобайкальск расположен на левом берегу р. Тья, на побережье северо-западного окончания оз. Байкал (рис. 1 / fig. 1). Сточные воды КОС города сбрасываются непосредственно в р. Тья с левого берега по двум трубам в 2,4 км выше устья по прямой (3,3 км по руслу реки). Ранее (в 2013 и 2019 гг.) и на момент обследования стоки поступали только по одной трубе.

Отбор проб произведен 13 сентября 2022 г. в ходе осенней кругобайкальской экспедиции на НИС «Г.Ю. Верещагин». Координаты станций отбора проб представлены в табл. 1 / tabl. 1, местоположение станций

показаны на рис. 1 / fig. 1. Сточные воды КОС г. Северобайкальска были отобраны непосредственно из трубы сброса (ст. WW). Пробы речных вод отбирали из левого (ст. Riv 130 LA) и правого (ст. Riv 120 RA) рукавов р. Тья в 130 и 120 м выше трубы сброса сточных вод, соответственно, а также в 650 м выше устья (ст. Riv). Вода на этой станции (ст. Riv) с большой вероятностью отражает конечный состав речных вод с учетом подмешивания сточных вод. Вследствие низкого рельефа и ветровых нагонных процессов отбор речных проб вблизи устья не целесообразен, поскольку смешение с байкальскими водами будет искажать состав речных вод. В прибрежной зоне Байкала (~ 1 м от уреза) были отобраны пробы воды в 530 м влево (ст. 530 CWL) и 550 м вправо (ст. 550 CWR) от устья основной протоки р. Тья, а также на более удаленных расстояниях – в 2,7 км вправо от устья (ст. 2.7k CWR), в 1,5 км влево от устья на лодочной станции Нептун (ст. Nep CWL). Последние две станции находятся на краях довольно широкой дельты р. Тья (~ 2,5 км). Дополнительно была отобрана проба прибрежной воды в 6,8 км влево от устья (ст. 6.8k CWL) вне зоны влияния р. Тья и г. Северобайкальска. В секторе 200-300 м от уреза в зоне влияния реки отобраны пробы поверхностной воды в 200 м напротив устья (ст. 200), в 200 м под углом влево от устья (ст. 200 L) и в 300 м под углом вправо от устья (ст. 300 R). В секторе 500-600 м от уреза в зоне влияния реки отобраны пробы поверхностной воды в 500 м напротив устья (ст. 500), в 600 м под углом влево от устья (ст. 600 L) и в 630 м под углом вправо от устья (ст. 630 R). В секторе 800 м от уреза в зоне влияния реки отобрана проба поверхностной воды в 800 м напротив устья (ст. 800). Фоновая проба байкальской воды была взята из фотического слоя (усредненная с горизонтов 0, 5, 10, 15, 20 и 25 м) в 3 км от берега (ст. 3k) напротив устья. Пробы из фотического слоя отбирали с борта НИС «Г.Ю. Верещагин» пластиковыми (ПЭ-SDR-17 (21)) батометрами (6 л – «OceanTest Equipment», Inc., USA, 12 л – «General Oceans, Inc.», США) и разливали в ПЭТ бутылки. Проба интерстициальной воды (ст. h) отобрана из лунки на стыке бокового рукава р. Тья и побережья озера в 280 м от основного устья.

Для многоэлементного ИСП-МС анализа пробы воды отбирали одноразовыми стерильными медицинскими шприцами (10 мл) непосредственно из объектов исследования. В гидрохимической лаборатории на борту НИС «Г.Ю. Верещагин» отобранные пробы в количестве 2 мл фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (размер пор 0,45 мкм, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные полипропиленовые пробирки Эппендорфа (2 мл, Axugen Scientific, Cat. No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта использовалась 70% HNO₃, дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), содержащая индий (1008 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Консервант добавляли в пробирки Эппендорфа весовым методом. Пробирки с отобранными образцами воды

взвешивали и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (типично 2%) и индия (типично 30 ppb). Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания $\pm 0,0003$ г).

Для определения гидрохимических и физико-химических параметров образцы воды отбирали в ПЭТ бутылки. Измерения pH проводили сразу же после отбора проб pH-метром testo 252 (Германия, точность определения $\pm 0,02$ pH).

Таблица 1

Описание и координаты отобранных проб воды в зоне влияния КОС г. Северобайкальска

Table 1

Description and coordinates of the collected water samples in the zone of influence of Severobaikalsk Town WTF

Станция // Station	Описание // Description	С.Ш.	В.Д.
Riv 130 LA	р. Тья, левый рукав, 130 м выше сброса КОС г. Северобайкальска	55,6186°	109,3174°
Riv 120 RA	р. Тья, правый рукав, 120 м выше сброса КОС г. Северобайкальска	55,6176°	109,3175°
WW	Труба сброса КОС г. Северобайкальска	55,6180°	109,3193°
Riv	р. Тья, 650 м выше устья основной протоки	55,6064°	109,3398°
h	Интерстициальная вода, 280 м вправо от устья р. Тья	55,6036°	109,3470°
530 CWL	Байкал, прибреж. вода 530 м влево от устья р. Тья	55,6100°	109,3478°
550 CWR	Байкал, прибреж. вода 550 м вправо от устья р. Тья	55,6001°	109,3478°
2.7k CWR	Байкал, прибреж. вода 2,7 км вправо от устья р. Тья	55,5926°	109,3144°
Нер CWL	Байкал, прибреж. вода 1,5 км влево от устья р. Тья (залив Нептун, лодочная станция)	55,6190°	109,3511°
6.8k CWL	Байкал, прибреж. вода 6,8 км влево от устья р. Тья (напротив тоннелей)	55,6632°	109,3856°
200	Байкал, поверхн. вода, 200 м по трансекте от устья р. Тья	55,6052°	109,3531°
200 L	Байкал, поверхн. вода, 200 м от устья р. Тья под углом влево	55,6068°	109,3526°
300 R	Байкал, поверхн. вода, 300 м от устья р. Тья под углом вправо	55,6033°	109,3528°
500	Байкал, поверхн. вода, 500 м по трансекте от устья р. Тья	55,6048°	109,3576°
600 L	Байкал, поверхн. вода, 600 м от устья р. Тья под углом влево	55,6091°	109,3569°
630 R	Байкал, поверхн. вода, 630 м от устья р. Тья под углом вправо	55,6011°	109,3561°
800	Байкал, поверхн. вода, 800 м по трансекте от устья р. Тья	55,6043°	109,3624°
3k	Байкал, фотический слой (0-25 м), 3 км от уреза напротив устья р. Тья	55,6017°	109,3973°

1.2. Многоэлементный ИСП-МС анализ

Подготовленные пробы воды измеряли на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500 се в ЦКП «Ультрамикроанализ» ЛИИ СО РАН в соответствии с разработанными ранее подходами [12]. Система ввода проб: боросиликатный распылитель MicroMist (режим подачи растворов – самораспыление), PFA распылительная камера, кварцевая горелка с системой ShieldTorch. Измерения проводили в режиме «горячей плазмы» (мощность генератора плазмы 1580 Вт) без столкновительной ячейки.

Растворы измерялись в сканирующем режиме с дополнительным загрузлением сигналов в 30 раз для изотопов Na_23, Al_27, Si_28, K_39 и In_115 (3 канала на массу, 0,05 с на канал, общее время сканирования масс-спектра – 62 с, промывка между пробами – 60 с).

Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, USA), образец байкальской бутилированной воды (для Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, [20]), а также растворы катионов (Na, Mg, K, Ca, Fe, Hg) и анионов (Si, P, S, Cl, Br, I), приготовленные смешением одноэлементных ИСП-МС стандартных растворов компании Inorganic Ventures (США): Na (Cat. No. MSNA-100PPM), Mg (Cat. No. MSMG-100PPM), K (Cat. No. MSK-100PPM), Ca (Cat. No. CGCA1), Fe (Cat. No. MSFE-100ppm), Hg (Cat. No. MSHGN-10PPM), Si (Cat. No. MSSI-100PPM), P (Cat. No. MSP-100ppm), S

(Cat. No. CGS1), Cl (Cat. No. CGICCL1), Br (Cat. No. CGICBR1), I (Cat. No. CGICI1). Металлы и Si в стандартных растворах присутствовали в азотнокислой среде, S и P в форме серной ортофосфорной кислот соответственно, галогениды – в водном растворе аммонийных солей. Концентрации элементов в рабочем стандартном растворе анионов и катионов готовили исходя из их типичных содержаний (кроме ртути и фосфора) в пресных природных водах: Na (3 ppm), Mg (3 ppm), K (1 ppm), Ca (16 ppm), Fe (0,3 ppm) и Hg (0,6 ppb), Si (2 ppm), P (1 ppm), S (5 ppm), Cl (4 ppm), Br (40 ppb) и I (20 ppb).

Корректировку на интерферирующие молекулярные ионы (MeO^+ , MeOH^+ , MeAg^+ , MeCl^+) проводили с использованием подхода, описанного в работе [16].

Ошибки измерения элементов, оценивали по экспериментально установленной зависимости коэффициента вариации (**RSD%**) от величины аналитического сигнала (N , имп./с): $\text{RSD}\% = 125,71 * N^{-0,33103}$, где $N = 20-20\ 000$ имп./с. Сигналы величиной более 20 000 имп./с характеризуются RSD 5% и лучше, сигналы величиной менее 20 имп./с характеризуются RSD более 50%. Типичные ошибки измерения (коэффициент вариации RSD), в зависимости от концентрации химических элементов находятся в следующих диапазонах: $<0,001$ мкг/дм³ – RSD>25%; 0,001-0,1 мкг/дм³ – RSD 25-10%; 0,1-1 мкг/дм³ – RSD 10-5%; >1 мкг/дм³ – RSD 5%.

1.3. Расчет общей минерализации воды. Расчет общей минерализации (ОМ) воды проводили по результатам многоэлементного ИСП-МС анализа с использованием баланса химических эквивалентов. При известных значениях pH рассчитывали соотношения равновесных формы угольной кислоты ($[\text{HCO}_3^-]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$ и $[\text{CO}_2]$), в отсутствии данных о pH полагали, что в типичных природных водах доминируют ее гидрокарбонатные формы (90-98% в диапазоне 7,3-9,4 pH). При составлении баланса химических эквивалентов измеренные концентрации химических элементов переводили в молярные концентрации их типичных ионных форм: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} . При содержании кремния менее 2 мМоль (56 мг/дм^3) полагали, что он находится в виде ортокремневой кислоты (H_4SiO_4 , слабодиссоциируемой при $\text{pH} < 9$), при более высоких концентрациях – в ее полимерных формах, условно, в виде линейного полимера $(\text{H}_2\text{SiO}_3)_n$ [5]. В расчет были также включены условно следовые элементы в формах: Li^+ , VO_3^{3-} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Sr^{2+} и Ba^{2+} , которые могут присутствовать в природных и техногенных водах в значимом количестве. Составленный баланс химических эквивалентов позволяет рассчитать суммарную концентрацию ионов, которые методом ИСП-МС не определяются (HCO_3^- , CO_3^{2-} и NO_3^- , полагая, что концентрация NO_3^- в водах значительно меньше суммарного содержания форм угольной кислоты) и оценить общую минерализацию воды по сумме всех ионов.

1.4. Расчет ошибок результатов математических операций. Расчет ошибок результатов математических операций в простых и сложных выражениях осуществлялся в соответствии с подходами, описанными в работе [18].

1. Для результатов сложения и/или вычитания.

Абсолютные ошибки:

$$t^* \pm \sigma^* = t_1 + t_2 - t_3 \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (1)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – абсолютные ошибки измерения переменных t_1 , t_2 и t_3 .

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\frac{(\bar{\sigma}_1 \times t_1)^2 + (\bar{\sigma}_2 \times t_2)^2 + (\bar{\sigma}_3 \times t_3)^2}{t^*}} \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$ и $\bar{\sigma}_3$ – относительные ошибки измерения переменных t_1 , t_2 и t_3 .

2. Для результатов умножения и/или деления.

Абсолютные ошибки:

$$t^* \pm \sigma^* = \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{t_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{t_3}\right)^2} = \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2} \quad (3)$$

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2} \quad (4)$$

2. Результаты и обсуждение

В исследуемых пробах были определены концентрации 72 химических элементов. Концентрации наиболее информативных элементов, использованных в работе, представлены в табл. 2 / tabl. 2.

Согласно полученным данным, сточные воды КОС Северобайкальска превышают установленные нормативы [6] по 6 из 35 нормируемым элементам: P (69 ПДК), Mn (6 ПДК), Zn (3,4 ПДК), Cu (2,1 ПДК), Mo (1,7 ПДК) и V (1,3 ПДК), и близки к предельно допустимым концентрациям по S (0,9 ПДК) и Na (0,7 ПДК).

Тепловая карта геохимических различий сточных, речных, интерстициальных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска относительно фоновых байкальских вод (ст. 3к) и фоновых речных вод (среднее для станций Riv 130 LA и Riv 120 RA – далее обозначается как Riv up), представлена на рис. 2 / fig. 2.

Из рис. 2 / fig. 2 следует, что концентрации большинства информативных химических элементов в сточных водах больше, чем в фоновых речных (столбец WW**). Наибольшее различие (> 10 раз), характерно для Cl (969 раз), P (238), Na (102), Zn (50), Sb (28), B (26), K (26), V (19), Mn (19), Rb (15) и Br (14). Общая минерализация сточных вод г. Северобайкальска составляла 400 мг/дм^3 , что в 4,8 раза выше, чем в фоновых водах р. Тья.

Концентрация информативных химических элементов (мкг/дм³) и общая минерализация (ОМ, мг/дм³) в отобранных пробах воды в зоне влияния КОС
г. Северобайкальска. В скобках указаны ошибки определения (отн. %)

Concentration of informative chemical elements ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) and total mineralization (ОМ, mg/dm^3) in collected water samples in the zone of Severobaikalsk Town WTF
influence. Determination errors are in brackets (rel. %)

Станция // Station	Riv 130 LA	Riv 120 RA	WW	Riv	h	530 CWL	550 CWR	2.7k CWR	Nep CWL	6.8k CWL	200	200 L	300 R	500	600 L	630 R	800	3k
Al	24 (5,0)	25 (5,0)	19 (5,0)	25 (5,0)	26 (5,0)	15,4 (5,0)	21 (5,0)	12 (5,0)	9 (5,0)	5,8 (5,0)	6,8 (5,0)	6,1 (5,0)	11,5 (5,0)	3,6 (5,0)	3,2 (5,0)	3,4 (5,0)	3,3 (5,0)	3,2 (5,0)
As	0,060 (17)	0,080 (15)	0,53 (8,1)	0,060 (17)	0,53 (8,2)	0,31 (9,7)	0,090 (14)	0,33 (9,5)	0,35 (9,4)	0,41 (8,9)	0,36 (9,3)	0,36 (9,3)	0,24 (10)	0,38 (9,1)	0,40 (8,9)	0,36 (9,2)	0,37 (9,1)	0,41 (8,8)
B	1,14 (5,0)	1,05 (5,0)	28 (5,0)	1,0 (5,0)	1,57 (5,0)	4,9 (5,0)	0,94 (5,0)	5,8 (5,0)	6,2 (5,0)	6,0 (5,0)	5,5 (5,0)	5,6 (5,0)	4,5 (5,0)	6,2 (5,0)	6,1 (5,0)	6,3 (5,0)	6,2 (5,0)	6,4 (5,0)
Ba	7,5 (5,0)	7,6 (5,0)	7,5 (5,0)	7,6 (5,0)	21 (5,0)	11,2 (5,0)	9,0 (5,0)	11,6 (5,0)	12,6 (5,0)	10,7 (5,0)	10,8 (5,0)	10,8 (5,0)	10,0 (5,0)	11,1 (5,0)	10,9 (5,0)	11,1 (5,0)	11,2 (5,0)	10,8 (5,0)
Be	0,022 (15)	0,023 (14)	0,0030 (28)	0,025 (14)	0,022 (15)	0,0050 (25)	0,017 (16)	0,0024 (30)	0,0023 (31)	0,0015 (35)	0,0027 (29)	0,0027 (29)	0,0070 (21)	0,0018 (34)	0,0013 (37)	0,0015 (35)	0,0015 (35)	0,0015 (35)
Br	3,7 (7,2)	3,6 (7,3)	52 (5,0)	3,6 (7,3)	4,5 (6,8)	8,5 (5,5)	3,8 (7,2)	8,7 (5,5)	10 (5,2)	9,8 (5,2)	8,6 (5,5)	8,8 (5,4)	7,7 (5,7)	9,8 (5,2)	9,8 (5,3)	9,6 (5,3)	9,1 (5,4)	9,5 (5,3)
Ca	12 900 (5,0)	13 000 (5,0)	29 000 (5,0)	12 900 (5,0)	16 600 (5,0)	16 800 (5,0)	12 600 (5,0)	16 800 (5,0)	20 000 (5,0)	16 700 (5,0)	16 600 (5,0)	16 700 (5,0)	15 600 (5,0)	16 800 (5,0)	16 800 (5,0)	17 100 (5,0)	17 000 (5,0)	16 800 (5,0)
Ce	0,38 (5,0)	0,41 (5,0)	0,096 (6)	0,42 (5,0)	1,42 (5,0)	0,175 (4,9)	0,39 (5,0)	0,078 (6,4)	0,053 (7,2)	0,0030 (19)	0,039 (8)	0,024 (9,4)	0,103 (5,8)	0,0038 (17)	0,0029 (19)	0,0046 (18)	0,0036 (18)	0,0036 (18)
Cl	87 (4,8)	72 (5,1)	77 000 (5,0)	112 (5,0)	300 (5,0)	650 (5,0)	92 (5,0)	530 (5,0)	1 900 (5,0)	560 (5,0)	560 (5,0)	570 (5,0)	410 (5,0)	550 (5,0)	580 (5,0)	570 (5,0)	560 (5,0)	580 (5,0)
Co	0,081 (7,1)	0,081 (7,1)	0,43 (5,0)	0,089 (6,9)	1,45 (5,0)	0,093 (6,8)	0,12 (6,3)	0,083 (7)	0,085 (7)	0,066 (7,6)	0,066 (7,6)	0,063 (7,7)	0,075 (7,3)	0,060 (7,9)	0,066 (7,6)	0,062 (7,8)	0,067 (7,6)	0,067 (7,6)
Cr	0,14 (12)	0,11 (13)	1,07 (6,1)	0,10 (14)	0,18 (11)	0,08 (14)	0,10 (13)	0,13 (12)	0,18 (11)	0,10 (13)	0,13 (12)	0,08 (14)	0,08 (14)	0,14 (12)	0,08 (14)	0,08 (14)	0,11 (13)	0,11 (13)
Cs	0,0070 (15)	0,0054 (16)	0,060 (7,1)	0,0059 (15)	0,0070 (15)	0,0038 (18)	0,0039 (18)	0,0021 (22)	0,0025 (20)	0,0017 (23)	0,0026 (20)	0,0026 (20)	0,0032 (19)	0,0015 (24)	0,0021 (22)	0,0019 (22)	0,0018 (23)	0,0014 (25)
Cu	0,48 (5,0)	0,48 (4,8)	2,1 (5,0)	0,55 (5,0)	1,01 (5,0)	0,37 (5,3)	0,52 (5,0)	0,43 (5,0)	0,66 (5,0)	0,41 (5,1)	0,28 (5,8)	0,28 (5,8)	0,37 (5,3)	0,22 (6,3)	0,28 (5,8)	0,39 (5,2)	0,24 (6,1)	0,22 (6,3)
Fe	33 (5,0)	31 (5,0)	160 (5,0)	40 (5,0)	490 (5,0)	86 (5,0)	118 (5,0)	30 (5,0)	50 (5,0)	12,7 (5,0)	16,8 (5,0)	16,7 (5,0)	20 (5,0)	13,9 (5,0)	13,4 (5,0)	9,2 (5,1)	10,3 (5,0)	10,3 (5,0)
Ga	0,012 (16)	0,013 (16)	0,030 (12)	0,012 (16)	<0,0006 (nd)	0,0060 (21)	0,011 (17)	0,0070 (19)	0,0035 (25)	0,0022 (29)	0,0031 (26)	0,0019 (30)	0,0028 (26)	0,0018 (31)	0,0009 (38)	0,0007 (41)	0,0009 (38)	0,0009 (38)
Ge	0,009 (23)	0,006 (26)	0,017 (19)	0,007 (25)	0,028 (16)	0,005 (29)	0,008 (24)	0,005 (28)	0,007 (25)	0,003 (32)	0,004 (29)	0,0022 (37)	0,0021 (37)	0,0026 (35)	0,003 (33)	0,0026 (35)	0,003 (32)	0,0014 (43)
HREE	0,0572 (6,7)	0,0633 (6,3)	0,0109 (11)	0,0609 (6,5)	0,0943 (5,4)	0,0124 (11)	0,0470 (7)	0,0071 (13)	0,0068 (13)	0,0038 (15)	0,0057 (14)	0,0035 (17)	0,0155 (9,7)	0,0021 (18)	0,0023 (17)	0,00099 (24)	0,0022 (17)	0,0012 (20)
I	1,19 (5,6)	0,62 (6,9)	3,6 (5,0)	0,41 (7,9)	1,35 (5,3)	2,6 (5,0)	0,48 (7,5)	2,2 (5,0)	3,0 (5,0)	3,5 (5,0)	1,9 (5,0)	2,1 (5,0)	1,51 (5,1)	2,4 (5,0)	3,1 (5,0)	2,3 (5,0)	2,5 (5,0)	3,5 (5,0)
K	670 (5,0)	670 (5,0)	17 400 (5,0)	680 (5,0)	1 550 (5,0)	960 (5,0)	670 (5,0)	980 (5,0)	1 130 (5,0)	970 (5,0)	940 (5,0)	960 (5,0)	870 (5,0)	970 (5,0)	950 (5,0)	980 (5,0)	980 (5,0)	990 (5,0)
La	0,45 (5,0)	0,48 (5,0)	0,038 (8)	0,48 (5,0)	0,80 (5,0)	0,13 (5,4)	0,32 (5,0)	0,058 (7)	0,037 (8,1)	0,007 (14)	0,039 (8)	0,021 (9,8)	0,108 (5,7)	0,0059 (15)	0,0065 (14)	0,0070 (14)	0,0047 (16)	0,0047 (16)
Li	1,04 (5,0)	1,18 (5,0)	2,5 (5,0)	1,08 (5,0)	0,93 (5,0)	2,9 (5,0)	1,1 (5,0)	2,7 (5,0)	2,7 (5,0)	2,7 (5,0)	2,4 (5,0)	3,0 (5,0)	2,4 (5,0)	2,9 (5,0)	3,0 (5,0)	2,9 (5,0)	2,9 (5,0)	2,3 (5,0)

Станиця // Station	Riv 130 LA	Riv 120 RA	WW	Riv	h	530 CWL	550 CWR	2.7k CWR	Nep CWL	6.8k CWL	200	200 L	300 R	500	600 L	630 R	800	3k
LREE	0,941 (3,2)	1,008 (3,2)	0,142 (4,6)	1,014 (3,2)	2,41 (3,4)	0,333 (3,4)	0,790 (3,2)	0,148 (4,4)	0,0980 (5,0)	0,0114 (10)	0,0860 (5,3)	0,0501 (6,3)	0,238 (3,7)	0,0107 (11)	0,0104 (11)	0,0129 (9,8)	0,0091 (11)	0,0091 (11)
Mg	3 100 (5,0)	3 100 (5,0)	7 300 (5,0)	3 100 (5,0)	3 800 (5,0)	3 500 (5,0)	3 000 (5,0)	3 200 (5,0)	4 400 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)
Mn	3,2 (5,0)	3,1 (5,0)	60 (5,0)	4,7 (5,0)	370 (5,0)	7,5 (5,0)	10,1 (5,0)	1,24 (5,0)	1,43 (5,0)	0,31 (5,0)	2,6 (5,0)	2,5 (5,0)	2,6 (5,0)	0,188 (5,0)	0,149 (5,4)	0,191 (5,0)	0,140 (5,5)	0,140 (5,5)
Mo	0,53 (5,6)	0,52 (5,6)	1,68 (5,0)	0,55 (5,5)	0,53 (5,5)	1,15 (5,0)	0,55 (5,5)	1,33 (5,0)	1,35 (5,0)	1,39 (5,0)	1,33 (5,0)	1,32 (5,0)	1,14 (5,0)	1,36 (5,0)	1,38 (5,0)	1,37 (5,0)	1,4 (5,0)	1,4 (5,0)
MREE	0,634 (4,2)	0,632 (4,3)	0,0714 (8)	0,665 (4,2)	1,11 (3,5)	0,157 (6,7)	0,435 (4,8)	0,071 (8,4)	0,0505 (9,4)	0,0285 (13)	0,0430 (9,8)	0,026 (12)	0,146 (6,8)	0,0095 (15)	0,0205 (13)	0,0058 (21)	0,0088 (16)	0,0074 (18)
Na	790 (5,0)	780 (5,0)	80 000 (5,0)	810 (5,0)	900 (5,0)	2 900 (5,0)	830 (5,0)	3 500 (5,0)	3 900 (5,0)	3 600 (5,0)	3 300 (5,0)	3 400 (5,0)	2 700 (5,0)	3 500 (5,0)	3 500 (5,0)	3 600 (5,0)	3 600 (5,0)	3 600 (5,0)
Ni	0,52 (6,2)	0,45 (6,5)	1,7 (5,0)	0,39 (6,9)	1,57 (5,0)	0,26 (7,8)	0,41 (6,7)	0,21 (8,4)	0,31 (7,4)	0,43 (6,6)	0,23 (8,2)	0,22 (8,3)	0,26 (7,9)	0,23 (8,1)	0,29 (7,6)	0,21 (8,4)	0,18 (8,8)	0,15 (9,4)
P	40 (5,0)	18,1 (5,0)	6 900 (5,0)	40 (5,0)	54 (5,0)	31 (5,0)	34 (5,0)	49 (5,0)	44 (5,0)	35 (5,0)	30 (5,0)	23 (5,0)	42 (5,0)	27 (5,0)	25 (5,0)	30 (5,0)	37 (5,0)	29 (5,0)
Pb	0,014 (13)	0,014 (13)	0,094 (6,9)	0,022 (11)	0,21 (5,2)	0,032 (9,8)	0,047 (8,7)	0,023 (11)	0,026 (10)	0,023 (11)	0,015 (12)	0,015 (12)	0,016 (12)	0,0060 (17)	0,010 (14)	0,022 (11)	0,007 (16)	0,006 (17)
Pr	0,111 (5,2)	0,118 (5,1)	0,0080 (12)	0,114 (5,1)	0,19 (5,0)	0,028 (8,1)	0,080 (5,8)	0,012 (11)	0,0080 (12)	0,0014 (22)	0,0080 (12)	0,0051 (14)	0,027 (8,2)	0,0010 (24)	0,0010 (25)	0,0013 (22)	0,0008 (26)	0,0008 (26)
Rb	1,05 (5,0)	1,06 (5,0)	15,5 (5,0)	1,07 (5,0)	2,6 (5,0)	0,93 (5,0)	1,05 (5,0)	0,70 (5,0)	0,73 (5,0)	0,59 (5,0)	0,67 (5,0)	0,67 (5,0)	0,79 (5,0)	0,59 (5,0)	0,59 (5,0)	0,60 (5,0)	0,61 (5,0)	0,61 (5,0)
S	3 100 (5,0)	2 700 (5,0)	14 200 (5,0)	2 700 (5,0)	3 000 (5,0)	2 100 (5,0)	2 300 (5,0)	2 200 (5,0)	2 500 (5,0)	2 000 (5,0)	1 770 (5,0)	1 600 (5,0)	2 200 (5,0)	1 900 (5,0)	1 780 (5,0)	1 900 (5,0)	2 000 (5,0)	2 200 (5,0)
Sb	0,015 (18)	0,010 (21)	0,35 (6,4)	0,011 (20)	0,019 (17)	0,025 (15)	0,013 (19)	0,031 (14)	0,092 (10)	0,034 (14)	0,025 (15)	0,022 (16)	0,025 (15)	0,028 (15)	0,034 (14)	0,030 (14)	0,025 (15)	0,025 (15)
Si	2 600 (5,0)	2 600 (5,0)	5 300 (5,0)	2 500 (5,0)	2 900 (5,0)	980 (5,0)	2 400 (5,0)	620 (5,0)	760 (5,0)	640 (5,0)	650 (5,0)	620 (5,0)	1 130 (5,0)	540 (5,0)	590 (5,0)	540 (5,0)	540 (5,0)	560 (5,0)
Sr	42 (5,0)	43 (5,0)	90 (5,0)	43 (5,0)	58 (5,0)	93 (5,0)	43 (5,0)	108 (5,0)	115 (5,0)	109 (5,0)	105 (5,0)	106 (5,0)	88 (5,0)	110 (5,0)	110 (5,0)	110 (5,0)	111 (5,0)	110 (5,0)
Th	0,056 (6,7)	0,055 (6,8)	0,027 (8,6)	0,054 (6,8)	0,099 (5,6)	0,016 (10)	0,056 (6,8)	0,012 (11)	0,0070 (13)	0,0010 (25)	0,0054 (15)	0,0043 (16)	0,018 (9,8)	0,0013 (24)	0,0012 (24)	0,00090 (26)	0,0014 (23)	0,0014 (23)
Ti	0,52 (9,8)	0,47 (10)	1,6 (6,7)	0,45 (10)	0,93 (8)	0,44 (10)	0,59 (9,4)	0,31 (12)	0,37 (11)	0,22 (13)	0,26 (12)	0,20 (13)	0,28 (12)	0,21 (13)	0,24 (13)	0,18 (14)	0,20 (13)	0,22 (13)
U	0,38 (5,0)	0,41 (5,0)	0,20 (5,0)	0,40 (5,0)	0,179 (5,0)	0,63 (5,0)	0,35 (5,0)	0,57 (5,0)	1,33 (5,0)	0,60 (5,0)	0,60 (5,0)	0,60 (5,0)	0,55 (5,0)	0,56 (5,0)	0,58 (5,0)	0,57 (5,0)	0,58 (5,0)	0,55 (5,0)
V	0,068 (7,6)	0,068 (7,6)	1,31 (5,0)	0,067 (7,7)	0,45 (5,0)	0,25 (5,0)	0,158 (5,8)	0,35 (5,0)	0,24 (5,0)	0,41 (5,0)	0,34 (5,0)	0,36 (5,0)	0,26 (4,9)	0,41 (5,0)	0,38 (5,0)	0,38 (5,0)	0,39 (5,0)	0,40 (5,0)
W	0,0090 (19)	0,011 (17)	0,020 (14)	0,010 (18)	0,010 (18)	0,034 (12)	0,0090 (19)	0,045 (11)	0,048 (11)	0,055 (10)	0,043 (11)	0,039 (11)	0,038 (11)	0,052 (10)	0,053 (10)	0,048 (10)	0,050 (10)	0,056 (10)
Y	0,25 (5,0)	0,25 (5,0)	0,041 (7,9)	0,23 (5,0)	0,38 (5,0)	0,059 (7)	0,154 (5,1)	0,032 (8,5)	0,034 (8,3)	0,025 (9,2)	0,025 (9,3)	0,015 (11)	0,060 (6,9)	0,008 (13)	0,020 (9,9)	0,0080 (14)	0,011 (12)	0,0080 (13)
Zn	0,84 (6,4)	0,51 (7,6)	34 (5,0)	0,54 (7,5)	1,08 (5,9)	0,28 (9,3)	0,4 (8,3)	0,32 (8,9)	0,87 (6,4)	0,32 (8,8)	0,39 (8,3)	0,4 (8,2)	0,33 (8,8)	0,4 (8,2)	0,29 (9,2)	0,35 (8,6)	0,36 (8,5)	0,36 (8,5)
Zr	0,021 (13)	0,018 (13)	0,031 (11)	0,019 (13)	0,068 (8,5)	0,016 (14)	0,020 (13)	0,010 (16)	0,010 (16)	0,004 (22)	0,0038 (22)	0,0050 (20)	0,0080 (17)	0,0038 (20)	0,0050 (20)	0,0050 (20)	0,0060 (19)	0,0038 (22)
OM	82 (3,0)	83 (3,0)	400 (2,5)	82 (3,0)	100 (2,9)	100 (3,1)	80 (3,0)	100 (3,1)	120 (3,0)	100 (3,1)	100 (3,2)	100 (3,2)	96 (3,1)	100 (3,2)	100 (3,2)	100 (3,2)	100 (3,2)	100 (3,1)

WW **	WW *	Riv **	h *	Riv up *	Riv *	Элемент Element	550 CWR *	530 CWL *	2.7k CWR *	Nep CWL *	6.8k CWL *	300 R *	200 *	200 L *	630 R *	500 *	600 L *	800 *
							Прибрежная зона Coastal zone					Сектор 200-300 м Sector of 200-300 m			Сектор 500-600 м Sector of 500-600 m			800 м
0,07	10	1,00	238	143	143	Pr	100	35	15	10	1,8	34	10	6,4	1,6	1,3	1,3	1,00
0,24	27	1,06	394	110	117	Ce	108	49	22	15	0,83	29	11	6,7	1,3	1,06	0,81	1,00
0,15	16	1,04	265	107	111	LREE	87	37	16	11	1,3	26	9,5	5,5	1,4	1,2	1,1	1,00
0,08	8,1	1,03	170	99	102	La	68	28	12	7,9	1,5	23	8,3	4,5	1,5	1,3	1,4	1,00
0,11	9,6	1,05	150	85	90	MREE	59	21	9,6	6,8	3,8	20	5,8	3,5	0,78	1,3	2,8	1,2
0,18	9,5	1,01	82	52	53	HREE	41	11	6,2	5,9	3,3	13	5,0	3,0	0,86	1,8	2,0	1,9
0,49	19	0,97	71	40	39	Th	40	11	8,6	5,0	0,71	13	3,9	3,1	0,64	0,93	0,86	1,00
19	429	1,5	2643	23	34	Mn	72	54	8,9	10	2,2	19	19	18	1,4	1,3	1,06	1,00
0,16	5,1	0,92	48	31	29	Y	19	7,4	4,0	4,3	3,1	7,5	3,1	1,9	1,00	1,00	2,5	1,4
0,13	2,0	1,1	15	15	17	Be	11	3,3	1,6	1,5	1,00	4,7	1,8	1,8	1,00	1,2	0,87	1,00
2,4	33	0,96	0,67	14	13	Ga	12	6,7	7,8	3,9	2,4	3,1	3,4	2,1	0,78	2,0	1,00	1,00
0,78	5,9	1,02	8,1	7,7	7,8	Al	6,6	4,8	3,8	2,8	1,8	3,6	2,1	1,9	1,06	1,1	1,00	1,03
2,3	12	0,93	20	5,4	5,0	Ge	5,7	3,6	3,6	5,0	2,1	1,5	2,9	1,6	1,9	1,9	2,1	2,1
1,6	8,2	0,97	18	5,1	5,0	Zr	5,3	4,2	2,6	2,6	1,05	2,1	1,00	1,3	1,3	1,00	1,3	1,6
2,0	9,5	0,96	5,2	4,6	4,5	Si	4,3	1,8	1,1	1,4	1,1	2,0	1,2	1,1	0,96	0,96	1,05	0,96
9,7	43	0,95	5,0	4,4	4,2	Cs	2,8	2,7	1,5	1,8	1,2	2,3	1,9	1,9	1,4	1,07	1,5	1,3
5,0	16	1,3	48	3,1	3,9	Fe	11	8,3	2,9	4,9	1,2	1,9	1,6	1,6	0,89	1,3	1,3	1,00
3,7	16	1,6	35	2,3	3,7	Pb	7,8	5,3	3,8	4,3	3,8	2,7	2,5	2,5	3,7	1,00	1,7	1,2
6,5	11	0,80	11	3,2	2,6	Ni	2,7	1,7	1,4	2,1	2,9	1,7	1,5	1,5	1,4	1,5	1,9	1,2
4,4	9,5	1,1	4,6	2,2	2,5	Cu	2,4	1,7	2,0	3,0	1,9	1,7	1,3	1,3	1,8	1,00	1,3	1,09
3,2	7,3	0,91	4,2	2,3	2,0	Ti	2,7	2,0	1,4	1,7	1,00	1,3	1,2	0,91	0,82	0,95	1,09	0,91
15	25	1,01	4,3	1,7	1,8	Rb	1,7	1,5	1,1	1,2	0,97	1,3	1,10	1,10	0,98	0,97	0,97	1,00
50	94	0,80	3,0	1,9	1,5	Zn	1,1	0,78	0,89	2,4	0,89	0,9	1,08	1,1	0,97	1,1	0,81	1,00
238	238	1,4	1,9	1,00	1,4	P	1,2	1,07	1,7	1,5	1,2	1,4	1,03	0,79	1,03	0,93	0,86	1,3
5,3	6,4	1,10	22	1,2	1,3	Co	1,8	1,4	1,2	1,3	0,99	1,1	0,99	0,94	0,93	0,90	0,99	1,00
4,9	6,5	0,93	1,4	1,3	1,2	S	1,05	0,95	1,00	1,1	0,91	1,0	0,80	0,73	0,86	0,86	0,81	0,91
2,4	2,3	1,00	1,2	0,97	0,97	Mg	0,94	1,09	1,00	1,4	1,00	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8,6	9,7	0,80	1,6	1,1	0,91	Cr	0,91	0,73	1,2	1,6	0,91	0,7	1,2	0,73	0,73	1,3	0,73	1,00
4,8	4,0	0,99	1,00	0,83	0,82	OM	0,80	1,00	1,00	1,2	1,00	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,2	1,7	1,00	0,99	0,77	0,77	Ca	0,75	1,00	1,00	1,2	0,99	0,9	0,99	0,99	1,02	1,00	1,00	1,01
0,51	0,36	1,01	0,33	0,72	0,73	U	0,64	1,1	1,04	2,4	1,09	1,0	1,09	1,09	1,04	1,02	1,05	1,05
0,99	0,69	1,01	1,9	0,70	0,70	Ba	0,83	1,04	1,07	1,2	0,99	0,9	1,00	1,00	1,03	1,03	1,01	1,04
26	18	1,01	1,6	0,68	0,69	K	0,68	0,97	0,99	1,1	0,98	0,9	0,95	0,97	0,99	0,98	0,96	0,99
2,3	1,09	0,97	0,40	0,48	0,47	Li	0,48	1,3	1,2	1,2	1,2	1,0	1,04	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
28	14	0,88	0,76	0,50	0,44	Sb	0,52	1,00	1,2	3,7	1,4	1,0	1,00	0,88	1,2	1,1	1,4	1,00
3,2	1,2	1,05	0,38	0,38	0,39	Mo	0,39	0,82	0,95	0,96	0,99	0,8	0,95	0,94	0,98	0,97	0,99	1,00
2,1	0,82	1,01	0,53	0,39	0,39	Sr	0,39	0,85	0,98	1,05	0,99	0,8	0,95	0,96	1,00	1,00	1,00	1,01
14	5,5	0,99	0,47	0,38	0,38	Br	0,40	0,89	0,92	1,05	1,03	0,8	0,91	0,93	1,01	1,03	1,03	0,96
102	22	1,03	0,25	0,22	0,23	Na	0,23	0,81	0,97	1,08	1,00	0,8	0,92	0,94	1,00	0,97	0,97	1,00
969	133	1,4	0,52	0,14	0,19	Cl	0,16	1,1	0,91	3,3	0,97	0,7	0,97	0,98	0,98	0,95	1,00	0,97
2,0	0,36	1,00	0,18	0,18	0,18	W	0,16	0,61	0,80	0,86	0,98	0,7	0,77	0,70	0,86	0,93	0,95	0,89
19	3,3	0,99	1,1	0,17	0,17	V	0,40	0,63	0,88	0,60	1,03	0,7	0,85	0,90	0,95	1,03	0,95	0,98
26	4,4	0,91	0,25	0,17	0,16	B	0,15	0,77	0,91	0,97	0,94	0,7	0,86	0,88	0,98	0,97	0,95	0,97
7,6	1,3	0,86	1,3	0,17	0,15	As	0,22	0,76	0,80	0,85	1,00	0,6	0,88	0,88	0,88	0,93	0,98	0,90
4,0	1,03	0,45	0,39	0,26	0,12	I	0,14	0,74	0,63	0,86	1,00	0,4	0,54	0,60	0,66	0,69	0,89	0,71

Ранг различий // Rank of differences	Ранг различий // Rank of differences
(14) >100 раз // times	(0) <0,01 раз // times
(13) 30-100 раз // times	(1) 0,01-0,033 раз // times
(12) 10-30 раз // times	(2) 0,033-0,1 раз // times
(11) 5-10 раз // times	(3) 0,1-0,2 раз // times
(10) 3-5 раз // times	(4) 0,2-0,33 раз // times
(9) 2-3 раза // times	(5) 0,33-0,5 раз // times
(8) 1,1-2 раз // times	(6) 0,5-0,91 раз // times
(7) 0,91-1,1 раз // times (7*) 0,91-1,1 раз – нет достоверных отличий // times - no reliable differences	(7*) ≤0,91 или ≥1,1 раз - нет достоверных отличий (перекрывание доверительных интервалов) // times - no reliable differences (overlapping of confidence intervals)

Рис. 2. Тепловая карта геохимических различий (в разях), сточных, речных, интерстициальных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска

Примечания: * – относительно фотического слоя в 3 км от уреза, ** – относительно р. Тья выше сброса сточных вод, OM – общая минерализация.

Fig. 2. Heat map of geochemical differences (in times) of waste, riverine, interstitial and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of wastewaters from Severobaikalsk town WTF

Notes: * – relative to photic layer in 3 km from water cut, ** – relative to the Tyra River above the waste waters discharge, OM – total mineralization.

При сравнении геохимического состава речных вод вблизи устья и на участке 120-130 м выше трубы сброса КОС (рис. 2 / fig. 2, столбец Riv**) влияние сточных вод обнаруживается только по P (1,4 раза) и Cl (1,4). Обогащение речной воды вблизи устья по Mn (1,5) и Fe (1,3), скорее всего, связано с мобилизацией этих элементов из заболоченных проток в приустьевой зоне. Обогащение по Pb (1,6) и Cu (1,2) также не связано с влиянием стоков, поскольку в самих стоках это обогащение невелико: Pb (6,7), Cu (4,4). Столь небольшой набор элементов и малые степени обогащения обусловлены тем, что сточные воды очень сильно разбавляются речными.

Из соотношений концентраций консервативных (не меняющих своей концентрации при прохождении физико-химических и биогеохимических барьеров) и наиболее контрастных (значительно различающихся по концентрации) элементов в сточных водах (C_{ww}), в реке до (C_{riv_up}) и после (C_{riv}) смешения (в устье) можно рассчитать долю сточных вод в общем речном потоке ($Part_{ww_riv}$) согласно подходам, разработанным ранее [13], по итоговому выражению:

$$Part_{ww_riv} = \frac{C_{riv} - C_{riv_up}}{C_{ww} - C_{riv_up}} \quad (5)$$

Для системы «р. Тья – сточные воды КОС г. Северобайкальска» единственным пригодным для расчета элементом является Cl, поскольку Mn и P не являются консервативными, а контрастность по Na недостаточна, чтобы по нему надежно различить фоновые речные воды (C_{riv_up}) и приустьевые речные воды после смешения (C_{riv}) (см. выше и рис. 2 / fig. 2, столбцы WW**, Riv**).

Доля сточных вод в общем речном потоке, рассчитанная по Cl согласно (5) составляет всего 0,042 ± 0,009%.

Геохимической особенностью р. Тья является высокое содержание редкоземельных элементов (LREE, MREE, HREE – суммы легких, средних и тяжелых лантанидов, соответственно), Th, Y, Be и Ga, концентрации которых на один-два порядка больше, чем в байкальской воде на фоновой станции (рис. 2 / fig. 2, столбцы Riv up*, Riv*). Наибольшее различие характерно для легких лантанидов (La, Ce, Pr) и их суммы (LREE), которое составляет два порядка. Высокий ранг различий (5-10 раз) также характерен и для Al, Ge и Zr. Данная особенность, вероятно, обусловлена геологическим строением бассейна района, поскольку концентрация этих элементов (за искл. Zr) аномально высока и в двух соседних притоках Байкала (р. Слюдянка, р. Рель), которые были опробованы ранее, в ходе экспедиции 2020 г. Указанные выше элементы (за исключением, Ga и Ge) – типичные терригенные труднорастворимые, которые обычно мигрируют в составе взвешенного вещества. Однако в данном случае, большая их часть, скорее всего, мигрирует в составе тонкодисперсных Fe-Al коллоидов (>50 кДа), стабилизированных органическим веществом [19, 17, 12], поскольку вода этих рек содержит очень мало взвеси. То есть, для дальнейшей оценки степени влияния р. Тья на приле-

гающую литораль, данные элементы, наряду с другими, будут рассматриваться как условно консервативные, пригодные для расчета водных вкладов основных источников смешения – загрязненных речных вод (ст. Riv) и байкальских фоновых вод (ст. 3к).

Тепловая карта геохимических различий исследованных вод (рис. 2 / fig. 2) ранжирована по степени убывания отношений концентрации элементов в р. Тья на приустьевом участке относительно байкальских фоновых вод (столбец Riv*) и визуально показывает степень влияния р. Тья на прилегающую литораль.

Визуально (рис. 2 / fig. 2) наибольшее сходство с речной водой наблюдается в прибрежных водах справа от устья основной протоки (ст. 550 CWR, 550 м от устья), в меньшей степени слева (ст. 530 CWL, 530 м от устья), и в наименьшей степени на правом краю дельты (ст. 2.7k CWR) в связи с большой удаленностью от устья (2,7 км). На левом краю дельты (ст. Nep CWL, 1,5 км от устья) прибрежная вода испытывает влияние дополнительных источников, в числе которых могут быть и антропогенные от лодочной станции Нептун. Это влияние проявляется в виде повышенных концентраций Ge, Cu, Zn, S, Mg, Cr, Ca, U, Ba, K, Sb и Cl по сравнению со станцией 530 CWL. Прибрежная вода вне зоны влияния р. Тья (ст. 6.8k CWL, 6,8 км влево от устья) по большинству информативных элементов не отличима от байкальской воды на фоновой станции, однако повышенное содержание ряда элементов (REE, Ga, Al, Si, Fe, Pb, Ni, Cu, P, Li и Sb) свидетельствует о береговом влиянии (абразия берегов, площадной смыв, дренаж интерстициальных вод).

В секторе 200-300 м от уреза большая степень влияния проявлена также на участке вправо от устья реки (ст. 300 R), что обусловлено воздействием береговых геострофических течений, направление которых в данном районе осуществляется против часовой стрелки [2]. Более того, во время отбора проб было умеренное волнение (~3 балла) с северо-восточным направлением ветра, что совпадает с направлением геострофических течений.

В секторах 500-600 и 800 м от уреза влияние р. Тья по большинству элементов не обнаруживается, за исключением некоторых редкоземельных элементов, марганца и йода. Эпизодические превышения байкальских фоновых концентраций наблюдаются по Al (1,1 раза), Fe (1,3 раза), Pb (1,7-3,7 раза), Ni (1,4-1,9 раза), Cu (1,3-1,8 раза), P (1,3 раза), Li (1,3 раза) и Sb (1,4 раза), однако это не связано с влиянием реки, поскольку степень обогащения этими элементами речных вод относительно фоновой станции 3к невелика (<10 раз). Скорее всего, это связано с факторами берегового влияния и неоднородностью распределения тонкодисперсной взвеси.

Интерстициальная вода (ст. h) вблизи устья испытывает сильное влияние р. Тья, на которое накладываются процессы взаимодействия воды с горными породами, что приводит к дополнительному обогащению интерстициальных вод большинством элементов (REE, Y, Th, Ge, Zr, Si, Cs, Pb, Ni, Cu, Ti, Rb, Z, P, Co, S, Mg, Cr, Ca, Ba, K, Sb, Sr, Br, Na, Cl, V, B, As, I), среди которых наибольшие степени обогащения (>10 раз от-

носителем речных вод) характерны для чувствительных к Red-Ох потенциалу Mn (79) и Fe (12), а также Co (16) и Pb (10), высокие (~3-10 раз) для типичных диагенетических As (8,8) и V (6,7), а также Ge (4,0), Ni (4,0), Ba (2,8), I (3,3) и Cl (2,7). В тоже время наблюдается заметное обеднение по U (2,2 раз), который, скорее всего, фиксируется органическим веществом, присутствующим в осадочных отложениях [4, 7].

Литоральные воды в зоне влияния р. Тья формируются за счет смешения двух основных источников – речной воды, загрязненной сточными водами (ст. Riv), и фоновой байкальской воды (ст. 3к). Для расчета водного вклада загрязненных речных вод в воды литорали ($Part_{riv_lit}$) мы применили подход, описанный в [14], с использованием системы уравнений для двух источников:

$$C_{i_расчет} = \frac{Part_{riv_lit} \times C_{i_riv} + Part_{bw_lit} \times C_{i_bw}}{Part_{riv_lit} + Part_{bw_lit}} \quad (6)$$

$$Part_{riv_lit} + Part_{bw_lit} = 1 \quad (7)$$

$$Part_{riv_lit} \geq 0; Part_{bw_lit} \geq 0 \quad (8)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_{i_расчет} - C_i}{C_i} \right) \times 100 \right]^2} \rightarrow 0 \quad (9)$$

где $C_{i_расчет}$ и C_i – расчетная и измеренная концентрация элемента i в объектах смешения (в прибрежных и поверхностных водах литорали Байкала), соответственно; C_{i_riv} , C_{i_bw} – измеренные концентрации элемента i в загрязненной речной и байкальской фоновой водах, соответственно, а $Part_{riv_lit}$, $Part_{bw_lit}$ – массовые (или объемные) доли соответствующих вод; Δ – среднеквадратичное расхождение расчетных и измеренных концентраций элементов в объектах смешения (в%).

Решение системы уравнений (6)-(9) является задачей на оптимизацию переменных (водных вкладов $Part_{riv_lit}$, $Part_{bw_lit}$) при поиске глобального минимума по параметру Δ и осуществлялось численными методами с помощью модуля «Поиск решения» в ПО Excel 2003.

Водные вклады сточных вод в литорали Байкала ($Part_{ww_lit}$) рассчитываются через полученные водные вклады загрязненных речных вод в литорали

Байкала и водный вклад сточных вод в р. Тья, полученный по (5), согласно [13]:

$$Part_{ww_lit} = Part_{riv_lit} \times Part_{ww_riv} \quad (10)$$

Для данной системы источников и объектов смешения информативные химические элементы охарактеризованы по степени контрастности, консервативности и надежности определения. На рис. 3 / fig. 3 они ранжированы по степени уменьшения фактора контрастности (FC):

$$FC = P/\Phi \quad (11)$$

где P/Φ – отношения концентраций элементов в источниках смешения: P – р. Тья (ст. Riv), Φ – байкальская вода на фоновой станции (ст. 3к). Для $P/\Phi < 1$ взяты обратные величины.

По фактору контрастности элементы условно разделены на **СВКт** – сверхвысоко контрастные ($FC > 100$), **ВКт** – высококонтрастные ($FC = 10-100$), **Кт** – контрастные ($FC = 5-10$), **СКт** – средне контрастные ($FC = 2-5$), **Нкт** – низко контрастные ($FC = 1,4-2$), **ОНкт** – очень низко контрастные ($FC < 1,4$).

По степени консервативности элементы разделены на **Тк** – типично консервативные главные элементы (Na, Cl); **К** – консервативные (B, I, W, Cs, Br, Sr, Mo, Li, Rb, Ba, Co, S, Ca, Mg, общая минерализация); **Ук** – условно консервативные, которые преимущественно мигрируют в растворенной форме, но в определенных условиях могут утилизироваться в твердую фазу (осаждение, сорбция – Ga, Ge, Pb, Ni, Cu, Sb, Zn, U) или, наоборот, ремобилизоваться из донных отложений в процессе диагенеза (д) (As, V), частично поглощаться гидробионтами (K, Si – частично биогенные (**чб**)), частично мигрировать в составе мелкодисперсной терригенной взвеси (**взв**) (Al, Cr, Ti). В данном случае к условно консервативным элементам отнесены трудно-растворимые REE, Y, Th, Be, Th, которые могут мигрировать в составе тонкодисперсных Fe-Al коллоидов, стабилизированных органическим веществом (**орг**); **НК** – неконсервативные, которые в водной среде легко меняют форму нахождения (растворенная / нерастворенная) при изменении окислительно-восстановительного потенциала (**о/в**) (Mn, Fe), или могут быть в значительной степени утилизированы гидробионтами (Р – биогенный (**б**)). В данном случае Si мы перенесли в категорию **УК(чб)**, поскольку из-за сильного влияния реки процессы смешения вод в литорали доминируют над процессами его биологической утилизации.

Элемент // Element	FC	Контрастность // Contrast	Консервативность // Conservative-ness	Надежность определения // Determination reliability	НизК, ОНизК во всех или в большинстве (*) объектов // In all or in most of objects	ОНизК в источниках смешения // in mixing sources	Группа {1} // Group {1}	Группа {2} // Group {2}	Группа {1}+{2} // Group {1}+{2}	Группа {все**} // Group {all**}
Pr	143	СВКт	УК(орг)	УНО	НизК*	Ф	1		1	1
Ce	117	СВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
LREE	111	СВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
La	102	СВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
MREE	90	ВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
HREE	53	ВКт	УК(орг)	УНО	НизК	Ф	1		1	1
Th	39	ВКт	УК(орг)	УНО	НизК	Ф	1		1	1
Mn	34	ВКт	НК (о/в)	НО						
Y	29	ВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
Be	17	ВКт	УК(орг)	УНО	НизК	Ф	1		1	1
Ga	13	ВКт	УК	УНО	ОНизК*	Ф				
I	8,5*	Кт	К	ННО						
Al	7,8	Кт	УК(взв)	НО						1
As	6,8*	Кт	УК(д)	УНО						1
B	6,4*	Кт	К	НО						1
V	6,0*	Кт	УК(д)	НО						1
W	5,6*	Кт	К	УНО	НизК	Р				
Cl	5,2*	Кт	ТК	НО				1	1	1
Zr	5,0	Кт	УК(взв)	УНО	НизК					
Ge	5,0	Кт	УК	ННО	ОНизК	Р, Ф				
Si	4,5	СКт	УК(чб)	НО				1	1	1
Na	4,4*	СКт	ТК	НО				1	1	1
Cs	4,2	СКт	К	УНО	ОНизК	Р, Ф				
Fe	3,9	СКт	НК (о/в)	ННО						
Pb	3,7	СКт	УК	УНО*	НизК	Ф				
Br	2,6*	СКт	К	УНО						1
Ni	2,6	СКт	УК	ННО						
Sr	2,6*	СКт	К	НО				1	1	1
Mo	2,5*	СКт	К	НО				1	1	1
Cu	2,5	СКт	УК	УНО*						
Sb	2,3*	СКт	УК	УНО	НизК					
Li	2,1*	СКт	К	НО						
Ti	2,0	СКт	УК(взв)	ННО						
Rb	1,75	НКт	К	НО				1	1	1
Zn	1,50	НКт	УК	УНО*						
K	1,46*	НКт	УК(чб)	НО				1	1	1
Ba	1,42*	НКт	К	НО						
P	1,38	ОНКт	НК(б)	УНО						
U	1,38*	ОНКт	УК	НО						
Co	1,33	ОНКт	К	УНО	НизК					
Ca	1,30*	ОНКт	К	НО						
S	1,23	ОНКт	К	ННО						
OM	1,22*	ОНКт	К	УНО						
Cr	1,10*	ОНКт	УК(взв)	ННО	НизК					
Mg	1,03*	ОНКт	К	НО						

Рис. 3. Классификация элементов по категориям контрастности, консервативности и надежности определения, выбор элементов и их групп для расчета вкладов загрязненных речных вод (*Part_riv_lit*) в формирование прибрежных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния р. Тья (элементы, исключенные из расчетов выделены красным шрифтом, "1" в группах – включенный в расчет элемент)

* **Примечание:** FC = P/Ф – фактор контрастности, отношение концентраций элементов в источниках смешения: P – р. Тья (riv), Ф – байкальская вода на фоновой станции (Зк) [для отношений P/Ф < 1 взяты обратные величины].

Контрастность: СВКт – сверхвысоко контрастные (FC > 100), ВКт – высококонтрастные (FC = 10-100), Кт – контрастные (FC = 5-10), СКт – средние контрастные (FC = 2-5), НКт – низко контрастные (FC = 1,4-2), ОНКт – очень низко контрастные (FC < 1,4). ** – все допустимые элементы.

Консервативность: ТК – типично консервативный, К – консервативный, УК – условно консервативный [(орг) – мигрирующий в составе тонкодисперсных органико-минеральных коллоидов, (чб) – частично биогенный, (д) – может быть диагенетического происхождения из осадков, (взв) – частично мигрирующий в составе тонкодисперсной взвеси], НК – неконсервативный [(о/в) – Red/Ox зависимый, (б) – биогенный].

Надежность определения: НО – надежно определяется во всех объектах, УНО – условно надежно определяемый [значимы поправки на интерференции и/или вычитание приборного фона или низкие концентрации (< 0,1 мкг/дм³) (НизК) или очень низкие (< 0,01 мкг/дм³, для Sb < 0,05 мкг/дм³) (ОНизК) во всех объектах или в их большинстве (НизК*, ОНизК*) или ОНизК в источниках смешения (Р и/или Ф). УНО* – условно надежно определяемый [эпизодическая контаминация проб или масс-спектрометра], ННО – ненадежно определяемые [сложность вычитания приборного фона, большие эффекты памяти, большое количество интерференций и/или сложности их учета при пороговых концентрациях анализа].

Fig. 3. Classification of the elements by categories of contrast, conservativeness and determination reliability, selection of elements and of their groups for calculation of fractions of polluted riverine waters (*Part_riv_lit*) into

the formation of coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Tyya R. (excluded from calculations elements are in red, "1" in the groups means an included in the calculations element)

* **Note:** $FC = P/\Phi$ – contrast factor, ratio of elements concentrations in mixing sources: P – the Tyya R. (Riv), Φ – Baikalian water at the background station (3k) [for ratios $P/\Phi < 1$, reversal values are taken].

Contrast: **CBKm** – ultrahigh contrast ($FC > 100$), **BKm** – high contrast ($FC = 10-100$), **Km** – contrast ($FC = 5-10$), **CKm** – medium contrast ($FC = 2-5$), **Hkm** – low contrast ($FC = 1.4-2$), **OHkm** – very low contrast ($FC < 1.4$). ** – all feasible elements.

Conservativeness: **TK** – typically conservative, **K** – conservative, **YK** – conventionally conservative [(**opr**) – migrating as part of finely-dispersed organic-mineral colloids, (**чб**) – partly biogenic, (**д**) – may be of diagenetic origin from sediments, (**взв**) – partly migrating as part of a finely-dispersed suspension], **HK** – non-conservative [(**о/ф**) – Red/Ox dependent, (**б**) – biogenic].

Determination reliability: **HO** – determined reliably in all objects, **YHO** – conventionally reliably determinable [valuable corrections to interference and/or subtraction of instrumental background or low concentrations ($< 0.1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) (**HузK**) or very low ($< 0.01 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, for $\text{Sb} < 0.05 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) (**OHузK**) in all objects or in their major part (**HузK***, **OHузK***) or **OHузK** in mixing sources (P and/or Φ)]. **YHO*** – conventionally reliably determinable [episodic contamination of samples or of the mass-spectrometer], **HHO** – non-reliably determinable [complexity in subtraction of instrumental background, great memory effects, a large amount of interferences and/or complexity in their taking into account at threshold concentration of an analyte].

По надежности определения элементы разделены на **HO** – надежно определяемые во всех объектах (Mn, Al, B, V, Cl, Si, Na, Sr, Mo, Li, Rb, K, U, Ca, Mg); **YHO** – условно надежно определяемые (REE, Th, Y, Be, Ga, As, W, Zr, Cs, Br, Sb, P, Co, OM), для которых значимы корректировки на интерференции и/или вычитание приборного фона (обычно Ga, As, Br, Sb, P) или концентрации элементов низки ($< 0,1 \text{ мкг}/\text{дм}^3$) или очень низки ($< 0,01 \text{ мкг}/\text{дм}^3$, для $\text{Sb} < 0,05 \text{ мкг}/\text{дм}^3$) во всех объектах (**НизK**, **ОНизK**) или в их большинстве (**НизK***, **ОНизK***) или очень низки в источниках смешения (**ОНизK(P)** – в реке, **ОНизK(Ф)** – в байкальской фоновой воде); **YHO*** – условно надежно определяемые, для которых эпизодически характерны контаминации проб или масс-спектрометра (Cu, Zn, Pb); **HHO** – ненадежно определяемые из-за сложностей вычитания приборного фона (S), больших эффектов памяти (I), большого количества интерференций и/или сложности их учета при пороговых концентрациях аналита (Fe, Ni, Ge, Ti, Cr).

Для получения корректных результатов мы исключили из расчетов все очень низко контрастные элементы (P, U, Co, Ca, S, OM, Cr, Mg), все ненадежно определяемые (I, Fe, Ni, Ge, Ti) и неконсервативные (Mn, Fe), а также **YHO***-элементы (Cu, Zn, Pb). Учитывая суммарно все характеристики по всем категориям, из оставшихся элементов исключили еще пять элементов: Ga (**BKт** + **YK**, но **YHO** + **ОНизK*** + **ОНизK(Ф)**), W (**Kт** + **K**, но **YHO** + **НизK** + **ОНизK(Ф)**), Zr (**Kт** + **YK(взв)**, но **YHO** + **НизK** + **ОНизK(Ф)**), Cs (**CKт** + **K**, но **YHO** + **ОНизK** + **ОНизK(P, Ф)**) и Sb (**CKт** + **YK**, но **YHO** + **НизK**). Мы также исключили Li, концентрация которого в большинстве объектов смешения достоверно выше, чем в источниках (пока не ясно с чем это связано), а также низкоконтрастный Ba, повышенная концентрация которого в прибрежных водах может быть следствием берегового влияния интерстициальных или подземных вод. Все исключенные элементы на рис. 3 / fig. 3 выделены красным шрифтом. Из оставшихся элементов в расчетах использован 21 элемент и

их суммы (La, Ce, Pr, LREE, MREE, HREE, Th, Y, Be, Al, As, B, V, Cl, Si, Na, Br, Sr, Mo, Rb, и K).

Расчеты велись отдельно по группам {1} REE, Th, Y, Be (**CBKт&BKт** + **YK(opr)** + **YHO** – 9 элементов), {2} Cl, Si, Na, Sr, Mo, Rb, K (**Kт&CKт&HKт** + **K&YK** + **HO&YHO** – 7 элементов), их суммам {1}+{2}, и по всем допустимым элементам ({1}+{2} + {Al, As, B, V, Br}).

Результаты расчетов водных вкладов загрязненных речных вод в прибрежные и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья представлены в табл. 3 / tabl. 3. Из табл. 3 / tabl. 3 следует, что водные вклады загрязненных речных вод (далее – водные вклады р. Тья), рассчитанные по разным группам элементов, довольно близки, поэтому далее мы будем использовать усредненные результаты. Рассчитанные водные вклады р. Тья количественно подтверждают те закономерности, которые были сделаны ранее из анализа тепловой карты геохимических различий (см. выше, и также рис. 2 / fig. 2). Наибольший водный вклад р. Тья наблюдается в прибрежной воде в 550 м вправо от устья (86%, ст. 550 CWR), в меньшей степени в поверхностной воде в 300 м вправо от устья (26%, ст. 300 R) и в прибрежной воде в 530 м влево от устья (24%, ст. 530 CWL), что согласуется с картиной характерных геострофических течений в этом районе, которые сносят речные воды вправо от дельты реки. Прибрежные воды на окончании правой части дельты, в 2,7 км от устья, уже достаточно сильно разбавлены байкальской водой – водный вклад р. Тья в них составляет ~ 9% (ст. 2.7k CWR). На левом окончании дельты в 1,5 км от устья прибрежная вода содержит ~ 8% загрязненных речных вод (ст. Nep CWL возле лодочной станции «Нептун»). В секторе 200-300 м от уреза водный вклад р. Тья составляет ~ 7% напротив устья (ст. 200) и ~ 4% под углом влево (ст. 200 L). В секторах 500-600 и 800 м от уреза поверхностная вода почти полностью байкальская, водный вклад р. Тья там составляет не более 0,5%.

Таблица 3

Вклад (в %) загрязненных речных вод (*Part_riv_lit*) и сточных вод (*Part_ww_lit*) в прибрежные и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья и сточных вод КОС г. Северобайкальска

Table 3

Fractions of polluted riverine waters (*Part_riv_lit*) and waste waters (*Part_ww_lit*) in coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of Tyua River and waste waters from Severobaikalsk town WTF

Группа // Group	Параметры и результаты расчета // Parameters and results of calculation	550	530	2.7k	Неп	300	200	200	630	500	600	800
		CWR	CWL	CWR	CWL	R	R	L	R	R	L	R
		Прибрежная зона // Coastal zone				Сектор 200-300 м // Sector of 200-300 m			Сектор 500-600 м // Sector of 500-600 m			800 м
{1}: REE, Th, Y, Be	N	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Искл. // Exc.	Th										
	<i>Part_riv_lit</i> {1}	71	23	10	7,5	23	6,9	3,8	0,053	0,18	0,096	0,047
	Δ, %	11	23	30	24	9,2	12	14	30	16	37	18
{2}: Cl, Si, Na, Sr, Mo, Rb,K	N	6	6	7	5	7	7	7	7	7	7	7
	Искл. // Exc.	Cl	Cl		Cl, K							
	<i>Part_riv_lit</i> {2}	99	25	4,3	8,8	32	5,7	4,0	0	0	1,4	0
	Δ, %	1,9	10	4,7	9,2	3,1	3,2	3,2	1,9	3,3	2,4	2,0
{1}+{2}	N	14	15	16	14	16	16	16	16	16	16	16
	Искл. // Exc.	Th, Cl	Cl		Cl, K							
	<i>Part_riv_lit</i> {1}+{2}	86	23	10	7,5	24	6,8	3,8	0,052	0,18	0,10	0,047
	Δ, %	23	19	23	20	9,1	9,5	11	22	13	28	14
{все** // all}: {1}+{2}+ {Al, As, B, V, Br}	N	18	20	21	19	21	21	21	21	21	21	21
	Искл. // Exc.	Th, Cl, B	Cl		Cl, K							
	<i>Part_riv_lit</i> {все** // all}	87	24	10	7,7	25	6,9	3,8	0,054	0,18	0,10	0,047
	Δ, %	22	21	24	24	14	11	12	20	11	24	12
Среднее // Average	<i>Part_riv_lit</i> (aver)	86	24	8,7	7,9	26	6,6	3,8	0,040	0,13	0,42	0,035
	Error_Part_riv_lit (aver), RSD%	14	3,3	33	8,0	16	9,3	2,9	67	67	154	67
Точность // Accuracy	<i>Part_ww_lit</i> (aver)	0,036	0,010	0,004	0,003	0,011	0,003	0,002	2*E-5	1*E-4	2*E-4	1*E-5
	Error_Part_ww_lit (aver), RSD%	26	22	40	23	27	24	22	70	70	155	70

Примечания: * – формирование групп элементов описано в тексте и показано на рис. 3 / fig. 3; N – количество элементов в группе; Δ, % – среднеквадратичное отклонение расчетных и измеренных концентраций элементов в объекте смешения, показывает качество расчета *Part_riv_lit*, (чем меньше, тем лучше); ** – все допустимые элементы; Искл. – элемент исключен из расчета, поскольку не удовлетворяет граничным условиям: его концентрация достоверно выше (выделено жирным шрифтом) или ниже (выделено не жирным шрифтом), чем в источниках смешения.

Notes: * – the formation of elements groups is described in the text and is shown in the Fig. 3; N is elements number in a group; Δ, % is standard deviation of calculated and measured elements concentrations in a mixing object, it shows the quality of calculation of *Part_riv_lit* (the less, the better); ** – all allowable elements; Искл. – the element is excluded from the calculation as it does not meet boundary conditions: its concentration is certainly higher (bold font) or lower (non-bold font) than in the mixing sources.

Более наглядно полученные результаты представлены на рис. 4 / fig. 4 и рис. 5 / fig. 5. На рис. 4 / fig. 4 показана кластерная диаграмма геохимических различий исследуемых объектов, рассчитанная методом Варда [22] по всем допустимым элементам (группа {все**}) с указанием водного вклада р Тья. Объекты

разделились на два основных кластера по несколько групп в каждом. Кластер {1} образуют интерстициальная вода {1}, речная вода {2a} и прибрежная вода с высоким вкладом речных вод (86%) на ст. 550 CWR в 550 м вправо от устья {26}.

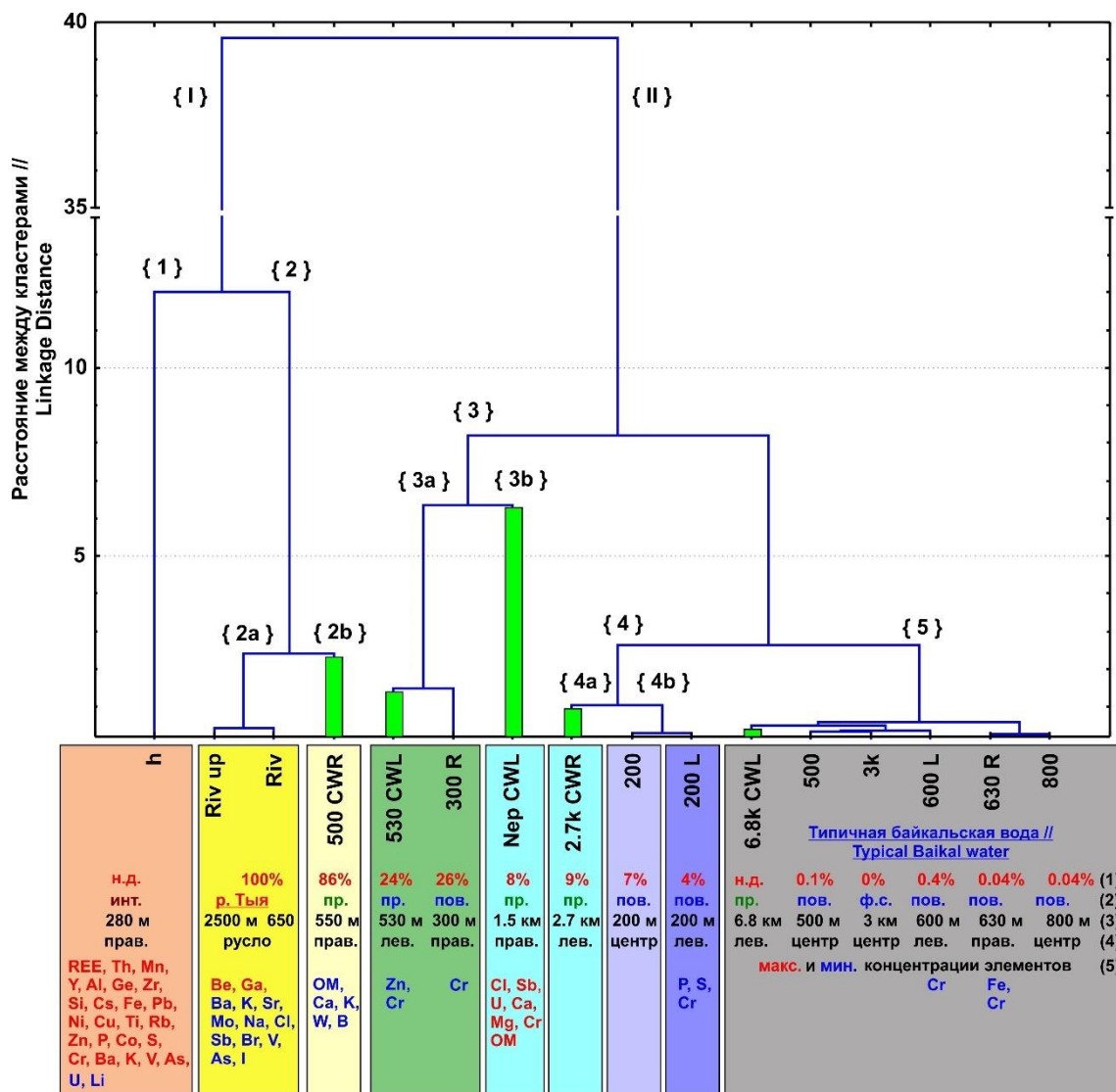


Рис. 4. Кластерная диаграмма геохимических различий основных источников (загрязненная речная вода, фоновая байкальская вода в фотическом слое в 3 км от уреза) и объектов смешения в литорали Байкала в зоне влияния р. Тья, а также прибрежной воды вне зоны ее влияния по 21 химическому элементу (REE, Th, Y, Be, Al, As, B, V, Cl, Si, Na, Br, Sr, Mo, Rb, K, см. рис. 3 / fig. 3), использованному для расчета водного вклада р. Тья (см. табл. 3 / tabl. 3)

* **Примечание:** Кластерный анализ выполнен в программе Statistica 10 методом Варда с евклидовыми расстояниями между кластерами. В цветных прямоугольниках указаны (1) водный вклад р. Тья (в %); (2) тип воды: инт. – интерстициальная, пр. – прибрежная, пов. – поверхностная, ф.с. – фотический слой Байкальских фоновых вод; (3) расстояние от устья реки, (4) направление от устья реки: русло – по руслу реки выше устья, центр – литораль напротив устья, лев. – литораль влево от устья (по течению реки), прав. – литораль вправо от устья; (5) максимальные (красный шрифт) и минимальные (синий шрифт) концентрации элементов в объектах. Зелеными толстыми линиями в группах выделены кластерные расстояния для прибрежной воды. Цифрами в фигурных скобках обозначены основные кластеры (римские цифры), и кластерные группы (арабские цифры).

Fig. 4. A cluster diagram of geochemical differences of main sources (polluted riverine water, background Baikalian water in the photic layer in 3 km from water edgea) and of mixing objects in Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Tyua R. as well as of coastal zone out of the zone of its influence by 21 chemical elements (REE, Th, Y, Be, Al, As, B, V, Cl, Si, Na, Br, Sr, Mo, Rb, K, see Fig. 3) used for calculation of the Tyua R. water fraction (see Tabl. 3.)

* **Note:** Cluster analysis is done using the software Statistica 10 by Ward – method with Euclidean distances between the clusters. In the colored rectangles there are: (1) water fraction of the Tyua R. (in %); (2) water type: *um.* – interstitial, *np.* – coastal, *nos.* – surface, *ф.с.* – photic layer of Baikalian background water; (3) distance from the river mouth, (4) direction from the river mouth: *русло* – along the river bed above the mouth, *центр* – littoral opposite to the mouth, *лев.* – littoral to the left from the mouth (along the river current), *прав.* – littoral to the right from the mouth; (5) maximal (red font) and minimal (blue font) concentrations of the elements in the objects. Green thick lines in the groups show cluster distances for coastal water. Figures in curly brackets mean main clusters (Roman numbers) and cluster groups (Arabic numbers).



Рис. 5. Тенденции изменения водного вклада загрязненных речных вод (желтая полупрозрачная заливка) и хлора сточных вод (сиреневая заливка) в прибрежные и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья

* **Примечание:** Круглыми символами отмечены станции отбора проб: желтые – речная вода, черный – труба сброса сточных вод КОС г. Северобайкальска, коричневый – интерстициальная вода, синие – прибрежная вода, розовые – поверхностная вода. Зеленая звездочка – устье основной протоки р. Тья. В устье р. Тья условными размерами кругов отмечены масштабы влияния: желтый круг – 100% речная вода, темно-сиреневый круг – вклад хлора сточных вод (29%), на станциях в литорали их вклады обозначены желтыми и красными цифрами, соответственно. Пунктирными стрелками обозначены направления геострофических течений.

Fig. 5. Trends in change of water fraction of polluted riverine waters (yellow semitransparent painting) and of chlorine from waste waters (lilac painting) into coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Tyua R.

* **Note:** Round symbols mark sampling stations: yellow ones – riverine water, black one – discharge pipe of WTF waste waters from Severobaikalsk town, brown one – interstitial water, blue ones – coastal water, pink ones – surface water. A green asterisk – mouth of main duct of the Tyua R. In the Tyua R. mouth, conventional circle sizes mark influence scales: a yellow circle – 100% riverine water, a dark lilac circle – fraction of chlorine from waste waters (29%), at the stations in the littoral their fractions are marked with yellow and red numbers, respectively. Dashed arrows mark directions of geostrophic currents.

Кластер {II} образуют станции с преобладанием байкальской воды. В группу {3} входят станции с водным вкладом р. Тья 24-26% (ст. 530 CWL и ст. 300 R, подгруппа {3a}), и прибрежная вода вблизи лодочной станции «Непгун» (ст. Nер CWL, {3b}), где водный

вклад р. Тья почти в три раза ниже (~8%). Статистически данная станция попала в группу {3}, вероятно, из-за максимальной концентрации Cl и повышенной концентрации K. Общая минерализация и концентрации Sb, U, Ca, Mg, Cr в этой воде также максимальны, а концентрация Ba одна из самых высоких (см. табл. 2 /

tabl. 2), что указывает на влияние грунтовых вод и, вероятно, антропогенного фактора. В следующую группу {4} входят станции с водным вкладом р. Тья в пределах ~ 4-9%. Это прибрежная вода на станции 2.7k CWR на правом краю дельты в 2,7 км от устья ({4a}, ~ 9%) и поверхностная вода в литорали Байкала в секторе 200 м от уреза напротив и влево от устья (подгруппа {4b}, ~ 4-7%). В наиболее многочисленную подгруппу {5}, которую условно можно обозначить как «Типичная байкальская вода», входят станции с минимальным водным вкладом р. Тья (< 0,5%) – поверхностные воды литорали Байкала в секторах 500-600 и 800 м от уреза, а также фотический слой на фоновой станции (ст. 3k) и прибрежная вода вне зоны влияния р. Тья – в 6,8 км влево от устья на окончании г. Северобайкальска (ст. 6.8k CWL).

На рис. 5 / fig. 5 представлен космоснимок с наложением тенденций изменения водных вкладов загрязненных речных вод (желтая полупрозрачная заливка) и хлора сточных вод (сиреневая заливка) в прибрежных и поверхностных водах литорали Байкала в зоне влияния р. Тья.

Очевидно, что геохимические вклады (GXB) по отдельным компонентам сточных вод могут быть как больше, так и меньше, чем водный вклад сточных вод. Это зависит от степени загрязненности сточных вод относительно объектов смешения. GXB представляет собой долю химического элемента сточных вод от общего содержания данного элемента в объекте смешения и рассчитывается с учетом возможного неконсервативного поведения элементов на физико-химических и биогеохимических барьерах [14]:

$$GXB = Part_{ww} \times C_{i_ww} / C_{i_расчет} \quad (12),$$

где $C_{i_расчет}$ – концентрация элемента i в объекте смешения, рассчитанная по (6) с учетом полученных водных вкладов от основных источников смешения (см. табл. 3 / tabl. 3).

Геохимические вклады сточных вод г. Северобайкальска в состав р. Тья и в состав прибрежных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния р. Тья представлены на рис. 6 / fig. 6 в виде тепловой карты и ранжированы по убыванию в секторе ~ 300 м от уреза.

Из полученных данных следует, что максимальное влияние сточных вод на р. Тья проявляется по Cl (29%). Далее в порядке уменьшения: двумя рангами ниже по P (~7%), затем по Na (~4%), затем по Zn (~3%), затем по Sb (1,3%), В (1,2%) и К (1,1%). Вклады по остальным элементам составляют менее 1%.

В прибрежной зоне, за исключением ст. 550 CWR, влияние сточных вод по P (0,77-2,2%) немного выше, чем по Cl (0,47-1,7%). На ст. 550 CWR, где речные воды преобладают (водный вклад 86%), вклады элементов сточных вод уменьшаются в той же последовательности, что и в устье: по Cl (16%), рангом ниже по P (~7%), затем двумя рангами ниже по Na (2,4%) и Zn

(2,4%). Вклады по остальным элементам на всех прибрежных станциях составляют менее 1%, в большинстве случаев – менее 0,1%.

В секторе ~ 200-300 м от уреза наибольшее влияние сточных вод проявляется по P (0,38-2,4%) и Cl (0,22-1,8%). Вклады по остальным элементам составляют менее 1%, в большинстве случаев – менее 0,1%.

В секторе ~ 500-600 м от уреза и в 800 м от уреза геохимическое влияние сточных вод минимальное – вклады по элементам не превышают 0,1%, в подавляющем большинстве случаев менее 0,01%. Наибольшее влияние сточных вод проявляется по Mn (0,006-0,07%), P (0,004-0,04%) и Cl (0,002-0,02%).

Вклад сточных вод по Mn при переходе от речных вод к прибрежным и поверхностным в секторе 200-300 м от уреза меняется в небольших пределах (0,54-0,31%), а далее резко падает до <0,1%.

На рис. 6 / fig. 6 также показаны суммарные геохимические вклады сточных вод КОС г. Северобайкальска по всем информативным элементам ($CGXB$) (41 элемент) и элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды [6] ($CGXB$ Пр. № 83). Из числа 35 нормируемых элементов были исключены малоинформативные (Se, Cd, Sn, Te) и Hg, которая в низких концентрациях (<0,1 мкг/дм³) методом ИСП-МС определяется ненадежно.

Наибольшим $CGXB$ характеризуется р. Тья – 53% и прибрежная вода на ст. 550 CWR – 35%, где наблюдается высокий водный вклад р. Тья (86%). На остальных прибрежных станциях $CGXB$ небольшой и составляет 2,8-7,5%. В секторе 200-300 м от уреза $CGXB$ сопоставим с прибрежным сектором и составляет 1,5-8,1%. В секторах 500-600 и 800 м от уреза $CGXB$ минимальный – 0,07-0,21%.

Основной вклад в первые ~ 80% $CGXB$ вносят: в р. Тья и на ст. 550 CWR – Cl (54-45%), P (14-19%), Na (7,8-7,0%) и Zn (5,0-6,96%); на остальных станциях литорали Байкала в прибрежной зоне – P (27-29%), Cl (17-22%), Zn (~ 11%), Mn (6,6-14%), Cs (3,3-4,0%), Na (2,8-3,7%), Rb (2,8-2,9%) и K (2,1-2,6%); в секторе 200-300 м от уреза – P (25-29%), Cl (15-23%), Zn (~ 9,9-11,3%), Mn (6,1-20%), Cs (3,2-4,0%), Na (2,4-3,8%), Rb (2,6-2,9%), K (1,9-2,6%) и Ga (2,1-2,4% на станциях 200 и 200 L). В секторах 500-600 и 800 м от уреза состав основных загрязнителей почти тот же, что и в секторе 200-300 м от уреза, однако наибольший вклад в $CGXB$ вносит Mn (32-34%). Вклады в $CGXB$ других элементов составляют: P (19-20%), Cl (~11%), Zn (~ 7,5-7,9%), Cs (3,4-3,6%), Ga (2,6-2,7%), Rb (2,0-2,1%) и Na (1,8-1,9%). Дополнительно, в сумму первых 80% $CGXB$ также попадает Se (1,5-2,0%).

Поскольку большинство нормируемых элементов (выделено зеленой заливкой на рис. 6 / fig. 6) входит в состав информативных элементов, то $CGXB$ Пр. № 83 по абсолютным значениям мало отличаются от $CGXB$. Состав и вклады основных загрязнителей, входящих в первые ~ 80% $CGXB$ Пр. № 83 почти такие же как и для $CGXB$.

Зона // Zone	Устье // Mouth	Прибрежная зона // Coastal zone				Сектор 200-300 м // Sector of 200-300 m			Сектор 500-600 м // Sector of 500-600 m			800 м
Станция // Station	Riv	550 CWR	530 CWL	2.7k CWR	Нер CWL	300 R	200	200 L	630 R	500	600 L	800
Part_ww, %	0,042	0,036	0,010	0,004	0,003	0,011	0,003	0,002	2*E-5	1*E-4	2*E-4	1*E-5
ГХВ error ± rel. %	22-38	29-55	22-38	40-55	22-43	28-43	24-44	22-46	70-84	70-84	155-167	70-84
P	7,3	6,5	2,2	0,85	0,77	2,4	0,64	0,38	<0,01	0,013	0,042	<0,01
Cl	29	16	1,7	0,52	0,47	1,8	0,39	0,22	<0,01	<0,01	0,023	<0,01
Zn	2,7	2,4	0,85	0,33	0,30	0,92	0,25	0,15	<0,01	<0,01	0,017	<0,01
Mn	0,54	0,54	0,49	0,41	0,40	0,50	0,38	0,31	<0,01	0,023	0,066	<0,01
Na	4,2	2,4	0,27	0,087	0,079	0,31	0,065	0,037	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cs	0,43	0,41	0,24	0,12	0,11	0,26	0,098	0,062	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Rb	0,61	0,56	0,22	0,087	0,080	0,23	0,067	0,040	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
K	1,1	0,87	0,19	0,066	0,060	0,21	0,050	0,029	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sb	1,3	1,0	0,16	0,054	0,049	0,18	0,040	0,023	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cr	0,45	0,38	0,100	0,036	0,033	0,11	0,027	0,016	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pb	0,18	0,17	0,096	0,047	0,043	0,10	0,037	0,023	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fe	0,17	0,16	0,093	0,046	0,042	0,098	0,036	0,023	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ni	0,18	0,17	0,083	0,037	0,033	0,088	0,028	0,017	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ga	0,11	0,10	0,085	0,059	0,056	0,087	0,051	0,037	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cu	0,16	0,15	0,071	0,031	0,028	0,075	0,024	0,015	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Br	0,61	0,42	0,065	0,021	0,019	0,072	0,016	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
S	0,22	0,20	0,062	0,023	0,021	0,067	0,018	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ge	0,10	0,099	0,063	0,033	0,031	0,065	0,027	0,017	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Co	0,20	0,18	0,060	0,023	0,021	0,065	0,017	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ti	0,15	0,14	0,059	0,024	0,022	0,063	0,019	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
B	1,2	0,57	0,055	0,017	0,016	0,062	0,013	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Si	0,090	0,086	0,052	0,027	0,025	0,055	0,021	0,014	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
OM	0,21	0,17	0,042	0,015	0,013	0,046	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
V	0,83	0,42	0,041	0,013	0,012	0,046	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zr	0,069	0,067	0,042	0,022	0,021	0,044	0,018	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mg	0,099	0,085	0,023	<0,01	<0,01	0,025	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Al	0,032	0,031	0,023	0,014	0,013	0,024	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ca	0,095	0,078	0,018	<0,01	<0,01	0,020	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Th	0,021	0,021	0,020	0,017	0,016	0,020	0,015	0,013	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
As	0,37	0,18	0,016	<0,01	<0,01	0,018	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mo	0,13	0,091	0,014	<0,01	<0,01	0,016	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
I	0,37	0,15	0,013	<0,01	<0,01	0,015	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Li	0,098	0,072	0,013	<0,01	<0,01	0,014	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sr	0,088	0,062	<0,01	<0,01	<0,01	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ce	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ba	0,042	0,034	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
HREE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Y	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
LREE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
W	0,085	0,044	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
MREE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Be	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
U	0,021	0,017	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
La	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pr	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
СГХВ, %	53	35	7,5	3,1	2,8	8,1	2,4	1,5	0,021	0,070	0,21	0,019
Error ± rel. %	13	22	9,1	16	9,1	11	9	8,6	29	29	63	29
СГХВ Пр. № 83, %	52	33	7,0	2,9	2,6	7,7	2,2	1,4	0,019	0,062	0,19	0,017
Error ± rel. %	13	23	10	17	10	12	10	9,3	33	33	70	33

ГХВ сточных вод // ГХВ of wastewaters	
> 50%	1-2%
30-50%	0,5-1%
20-30%	0,3-0,5%
10-20%	0,2-0,3%
5-10%	0,1-0,2%
3-5%	0,01-0,1%
2-3%	< 0,01%

Рис. 6. Тепловая карта геохимических вкладов (ГХВ, в %) сточных вод г. Северобайкальска в состав р. Тья и в состав воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья в сопоставлении с водными вкладами сточных вод (Part_ww)

* **Примечание:** СГХВ – суммарные геохимические вклады по всем компонентам, СГХВ Пр. № 83 – суммарные геохимические вклады по элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды [7]. OM – общая минерализация.

Fig. 6. Heat map of geochemical fractions (ГХВ, %) of Severobaikalsk town wastewaters in the composition of Tyya R. and in the coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of Tyya R. compared to water fractions of wastewaters (Part_ww)

* **Note:** СГХВ – summary geochemical fractions by all components, СГХВ Пр. № 83 – summary geochemical fractions by elements according to the Order No 83 of Ministry of Natural Resources [7]. OM – total mineralization.

Заклучение

С помощью геохимического метода определены водные и геохимические вклады сточных вод КОС г. Северобайкальска в состав р. Тья и в состав прибрежных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния р. Тья. В литоральных водах также определены водные вклады основных источников: сточные, речные и фоновые байкальские воды.

Установлено, что водный вклад сточных вод КОС г. Северобайкальска в общий речной сток р. Тья очень мал (~0,04%) вследствие большой водности самой реки.

Водный вклад р. Тья в литорали Байкала составляет 86-8% в прибрежной зоне (~1 м от уреза и на удалении до 2,7 км латерально от устья), в поверхностной воде напротив основной протоки – 26-4% в секторе 200-300 м от уреза и менее 0,5% в секторах 500-600 и 800 м от уреза. Соответствующие доли сточных вод в литорали Байкала составляют 0,036-0,003%, 0,011-0,002% и менее 0,0002% соответственно. В прибрежной зоне и в секторе 200-300 м от уреза наибольшая доля речных вод наблюдается в правой части от основной протоки, что обусловлено их сносом в соответствии с направлением геострофических течений в этом районе.

Из исследованных объектов наибольшему геохимическому влиянию сточных вод КОС г. Северобайкальска подвергается р. Тья и прибрежная вода в литорали Байкала в 550 м вправо от устья основной протоки, где водный вклад речных вод максимальный (86%). В этих объектах суммарный геохимический вклад сточных вод, рассчитанный по 41 информативному химическому элементу (СГХВ), составляет 53 и 35% соответственно. На остальных станциях в литорали Байкала в прибрежной зоне СГХВ небольшой и составляет 2,8-7,5%. В секторе 200-300 м от уреза СГХВ сопоставим с прибрежной зоной и составляет 1,5-8,1%. В секторах 500-600 и 800 м от уреза СГХВ минимальный – 0,07-0,21%.

В р. Тья основным загрязняющим элементом сточных вод является Cl – его геохимический вклад составляет 29%, высокие вклады также характерны для P (~7%), Na (~4%), Zn (~3%), Sb (1,3%), B (1,2%) и K (1,1%). Вклады по остальным элементам менее 1%. Наибольшее геохимическое влияние сточных вод в прибрежной зоне проявляется по Cl (16-0,47%) и P (7-0,77%), в меньшей степени по Na (2,4-0,1%) и Zn (2,4-0,33%), вклады по остальным элементам составляют менее 1%, в большинстве случаев – менее 0,1%. В секторе ~200-300 м от уреза наибольшее влияние сточных вод проявляется по P (0,38-2,4%) и Cl (0,22-1,8%), вклады по остальным элементам составляют менее 1%, в большинстве случаев – менее 0,1%. В секторах ~500-600 м и 800 м от уреза геохимическое влияние сточных вод минимальное – вклады по элементам от сточных вод не превышают 0,1%, в подавляющем большинстве случаев менее 0,01%. Наибольшее влияние сточных вод здесь заметно по Mn (0,006-0,07%), P (0,004-0,04%) и Cl (0,002-0,02%).

Учитывая все рассмотренные показатели можно заключить, что основное влияние загрязненных вод р. Тья на прилегающую литораль Байкала ограничено сектором 200-300 м от уреза во фронтальном направлении, и далее, к границам сектора 500-600 м от уреза,

сильно падает, однако в прибрежной зоне распространяется за пределы дельты (далее 2,7 км вправо и 1,5 км влево от устья основной протоки).

Прибрежная вода вне зоны влияния р. Тья (за северной оконечностью г. Северобайкальска) по большинству информативных элементов неотличима от байкальской воды на фоновой станции, однако повышенное содержание ряда элементов (REE, Ga, Al, Si, Fe, Pb, Ni, Cu, P, Li и Sb) свидетельствует о береговом влиянии (абразия берегов, площадной смыв, дренаж интерстициальных вод).

В сточных водах КОС г. Северобайкальска обнаружено превышение нормативов по P (69 ПДК), Mn (6 ПДК), Zn (3,4 ПДК), Cu (2,1 ПДК), Mo (1,7 ПДК) и V (1,3 ПДК) из 35 химических элементов, установленных для сточных вод, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон Байкальской природной территории.

Сведения об авторском вкладе

Е.П. Чебыкин – отбор и многоэлементный ИСП-МС анализ проб воды; сбор и анализ научных публикаций; разработка геохимического метода для решения поставленных задач; подготовка графического материала и сводного варианта рукописи, итоговые выводы.

Н.Н. Куликова – полевые работы; развитие концепции биогеохимических исследований; подготовка отдельных частей рукописи.

Е.В. Лихошвай – научное руководство; постановка задач; организация экспедиции; редактирование рукописи; итоговые выводы.

А.Н. Сутурин – научное руководство; концепция исследований; итоговые выводы.

Contribution of the authors

E.P. Chebykin – sampling and multi-element ICP-MS analysis of water samples; search and analysis of scientific publications; development of a geochemical method for solving the tasks set; preparation of graphic material and writing of the manuscript, final conclusions.

N.N. Kulikova – field work; development of the concept of biogeochemical research; writing individual parts of the manuscript.

Ye.V. Likhoshway – scientific management; problem statement; organization of the expedition; editing the manuscript; final conclusions

A.N. Suturen – scientific management; research concept; final conclusions.

Список источников

1. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. 291 с.
2. Верболов В.И. Течения и водообмен в Байкале // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 4. С. 413-423.
3. Грачев М.А. Что грозит Байкалу? // В мире науки. 2015. № 1. С. 4-15.
4. Гавшин В.М., Бобров В.А., Богданов Ю.А. Урановые аномалии в глубоководных отложениях озера Байкал // Доклады академии наук. 1994. Т. 34. № 3. С. 356-359.

5. Мышляева Л.В., Краснощечков В.В. Аналитическая химия кремния (серия «Аналитическая химия элементов»). М: Наука, 1972. 212 с.
6. Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал: приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83 от 21.02.2020 г.
7. Пампура В.Д., Сандимиров И.В., Медведева С.А., Улыбушева Е.И., Черная Л.И., Сандимирова Г.П., Арсентьева А.Г., Поповская Г.И. Изотопный состав урана и тория органической фракции донных осадков озера Байкал // Геохимия. 1996. № 4. С. 357-369.
8. 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 оз. Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 43-54. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(43-54\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(43-54))
9. Тимошкин О.А., Мальник В.В., Сакирко М.В., Бодедкер К. Экологический кризис на Байкале: учёные ставят диагноз // Наука из первых рук. 2014. Т. 59. № 5. С. 75-91.
10. Тимошкин О.А., Сакирко М., Анненков В., Чебыкин Е., Непокрытых А., Зайцева Е., Шевелёва Н., Мальник В., Лухнёв А, Иванов Е., Короткоручко В. Байкал: экология. О чрезвычайной ситуации в районе Северобайкальска // Аргументы недели. Вып. от 13.03.2014. 2014. С. 16-17.
11. Ханаев И.В., Дзюба Е.В., Кравцова Л.С., Грачев М.А. Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтокрылки *Cottocomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (Cottidae) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Доклады РАН. 2016. Т. 467. № 1. С. 119-121. <https://doi.org/10.7868/S0869565216070306>
12. Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 5. С. 613-631.
13. Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Геохимический метод оценки влияния загрязненных стоков на водные объекты на примере г. Слюдянка, р. Похабиха и Южного Байкала // Геосферные исследования. 2024, в печати.
14. Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод КОС г. Байкальска: оценка геохимическим методом // Геосферные исследования. 2024, в печати.
15. Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2023 года (с учетом итогов Всероссийской переписи населения 2020 г.). Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_MO_2023.xls (дата обращения: 22.11.2023).
16. Aries S., Valladon M., Polve M., Dupre B. A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples // Geostandards Newsletter. 2000. Vol. 24. № 1. pp. 19-31. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x>
17. Bagard M.L., Chabaux F., Pokrovsky O.S., Viers J., Prokushkin A.S., Stille P., Rihs S., Schmitt A.D., Dupre B. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. Vol. 75. pp. 3335-3357. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.03.024>
18. Geyh M.A., Schleicher H. Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application. Heidelberg: Springer Berlin. 1990. 503 p.
19. Pokrovsky O.S., Schott J., Dupre B. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2006. Vol. 70. pp. 3239-3260. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.008>
20. 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. 2003. Vol. 58. pp. 277-288. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(02\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00157-X)
21. Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Moore M.V., Belykh O.I., Malnik V.V., Sakirko M.V., Shirokaya A.A., Bondarenko N.A., Domysheva V.M., Fedorova G.A., Kochetkov A.I., Kuzmin A.V., Likhnev A.G., Medvezhonkova O.V., Nepokrytykh A.V., Pasyukova E.M., Poberezhnaya A.E., Potapskaya N.V., Rozhkova N.A., Sheveleva N.G., Tikhonova I.V., Timoshkina E.M., Tomberg I.V., Volkova E.A., Zaitseva E.P., Zvereva Yu.M., Kupchinsky A.B., Bukshuk N.A. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // Journal of Great Lakes Research. 2016. № 42. pp. 487-497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>
22. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American Statistical Association. 1963. Vol. 58. pp. 236-244.

References

- Berkin, N., Makarov, A. and Rusinek, O., 2009. *Baikalovedenie* [Baikal studies]. Irkutsk, Irkutsk State University Publishing house. 291 p. (In Russian)
- Verbolov, V., 1996. Tcheniya i vodoobmen v Baikale [Currents and Water Exchange in Lake Baikal]. *Water Resources*. 23(4), pp. 381-391. (In Russian)
- Grachev, M., 2015. Chto grozit Baikalu? [What threatens Baikal?]. *In the World of Science*. 1, pp. 4-15. (In Russian)
- Gavshin, V., Bobrov, V. and Bogdanov, Yu., 1994. Uranovye anomalii v glubokovodnykh otlozheniyakh ozera Baikal [Uranium anomalies in deep-sea sediments of Lake Baikal]. *Doklady Earth Sciences*. 34(3), pp. 356-359. (In Russian)
- Myshlyayeva, L. and Krasnoshechekov, V., 1972. *Analiticheskaya khimiya kremniya (seriya «Analiticheskaya khimiya elementov»)* [Analytical chemistry of silicon (series "Analytical chemistry of elements")]. Moscow, Publishing house "Nauka". 212 p. (In Russian)
- Ob utverzhdenii normativov predel'no dopustimyykh vozdeystvii na unikal'nyuyu ekologicheskuyu sistemu ozera Baikal i perechnya vrednykh veshchestv, v tom chisle

veshchestv, odnosyashchikhsya k kategoriyam osobo opasnykh, vysokoopasnykh, opasnykh i umerenno opasnykh dlya unikal'noi ekologicheskoi sistemy ozera Baikal [On Approval of the Standards of maximum permissible impacts on the Unique Ecological system of Lake Baikal and the List of harmful Substances, including substances belonging to the categories of especially dangerous, highly dangerous, dangerous and moderately dangerous for the unique ecological system of Lake Baikal]. Decree of Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation № 83 from 21.02.2020. (In Russian)

7. Pampura, V., Sandimirov, I., Medvedeva, S., Ulybusheva, E., Chernaya, L., Sandimirova, G., Arsen'teva, A. and Popovskaya, G., 1996. Isotopic composition of uranium and thorium in the organic fraction of bottom sediments of Lake Baikal. *Geochemistry International*. 34(4), pp. 318-329. (In Russian)

8. Suturin, A., Chebykin, E., Mal'nik, V., Khanaev, I., Minaev, A. and Minaev, V., 2016. Rol' antropogennykh faktorov v razvitiy ekologicheskogo stressa v litorali oz. Baikal (akvatoriya pos. Listvyanka) [The role of anthropogenic factors in the development of ecological stress in Lake Baikal littoral (the Listvyanka settlement lakescape)]. *Geography and Natural Resources*. 6, pp. 43-54. [https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2016-6\(43-54\)](https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2016-6(43-54)) (In Russian)

9. Timoshkin, O., Malnik, V., Sakirko, M. and Boedeker K., 2015. Ecological crisis on Lake Baikal: diagnosed by scientists. *Science First Hand*, 2(41), pp. 25-41. (In Russian)

10. Timoshkin, O., Sakirko, M., Annenkov, V., Chebykin, E., Nepokrytykh, A., Zaytseva, E., Sheveleva, N., Mal'nik, V., Lukhnev, A., Ivanov, E. and Korotkoruchko, V., 2014. Baikal: ekologiya. O chrezvychainoi situatsii v raione Severobaikal'ska [Baikal: ecology. About the emergency situation in the Severobaikalsk area]. *Arguments of the Week*. Iss. dated 03.13.2014. pp. 16-17. (In Russian)

11. Khanaev, I., Dzyuba, E., Kravtsova, L., Grachev, M., 2016. The effect of bloom of filamentous green algae on the reproduction of yellowfin sculpin *Cottomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (Cottoidae) during ecological crisis in Lake Baikal. *Doklady Biological Sciences*, 467(1), pp. 63-64. <https://doi.org/10.1134/S0012496616020022> (In Russian)

12. Chebykin, E., Sorokovikova, L., Tomberg, I., Vodneva, E., Rasskazov, S., Khodzher, T. and Grachev, M., 2012. Sovremennoe sostoyanie vod r. Selengi na territorii Rossii po glavnym komponentam i sledovym elementam [Modern state of water in the Selenga river at the territory of Russia over major components and trace elements]. *Chemistry for Sustainable Development*. 20(5), pp. 613-631. (In Russian)

13. Chebykin, E., Kulikova, N., Likhoshway, Ye. and Suturin, A., 2024. Geokhimicheskii metod otsenki vliyaniya zagryaznennykh stokov na vodnye ob"ekty na primere g. Slyudyanka, r. Pokhabikha i Yuzhnogo Baikala [Geochemical method of assessment of the impact of polluted drains onto water bodies illustrated by Slyudyanka City, the Pokhabikha River and South Baikal]. *Geosphere Research*, in press. (In Russian)

14. Chebykin, E., Kulikova, N., Likhoshway, Ye., Suturin, A., 2004. Zagryaznenie poverkhnostnykh vod litorali oz. Baikal v zone vliyaniya stochnykh vod KOS g. Baikal'ska: otsenka geokhimicheskim metodom [Pollution of Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Baikalsk town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method]. *Geosphere Research*, in press. (In Russian)

15. The number of permanent population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2023 (taking into account the results of the All-Russian Population Census of 2020). *Federal State Statistics Service of the Russian Federation*. Available from: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_MO_2023.xls [Accessed 12th May 2023]. (In Russian)

16. Aries, S., Valladon, M., Polve, M. and Dupre, B., 2000. A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples. *Geostandards Newsletter*, 24(1), pp. 19-31. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x>

17. Bagard, M., Chabaux, F., Pokrovsky, O., Viers, J., Prokushkin, A., Stille, P., Rihs, S., Schmitt, A. and Dupre, B., 2011. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, pp. 3335-3357. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.03.024>

18. Geyh, M. and Schleicher, H., 1990. *Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application*. Heidelberg, Springer Berlin. 503 p.

19. Pokrovsky, O., Schott, J. and Dupre, B., 2006. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, pp. 3239-3260. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.008>

20. Suturin, A., Paradina, L., Epov, V., Semenov, A., Lozhkin, V., Petrov, L., 2003. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water. *Spectrochimica Acta Part B*, 58, pp.277-288. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(02\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00157-X)

21. Timoshkin, O., Samsonov, D., Yamamuro, M., Moore, M., Belykh, O., Malnik, V., Sakirko, M., Shirokaya, A., Bondarenko, N., Domyseva, V., Fedorova, G., Kochetkov, A., Kuzmin, A., Lukhnev, A., Medvezhonkova, O., Nepokrytykh, A., Pasyukova, E., Poberezhnaya, A., Potapskaya, N., Rozhkova, N., Sheveleva, N., Tikhonova, I., Timoshkina, E., Tomberg, I., Volkova, E., Zaitseva, E., Zvereva, Yu., Kupchinsky, A. and Bukshuk, N., 2006. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger?. *Journal of Great Lakes Research*, 42, pp. 487-497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>

22. Ward, J., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, pp. 236-244.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 12.11.2024.

The article was submitted 29.10.2024; approved after reviewing 08.11.2024; accepted for publication 12.11.2024.