

Влияние водных источников на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал

Е.П. Чебыкин, Н.Н. Куликова, А.Н. Сутурин

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Геохимическим методом установлена степень влияния водных источников на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал в 2022 и 2024 гг. Определены водные вклады (ВВ), геохимические вклады (ГХВ) и суммарные геохимические вклады (СГХВ) источников (чистые речные, сточные и байкальские воды) в объекты смешения (р. Похабиха в устье, литораль Байкала). Более низкие ВВ сточных вод г. Слюдянки в р. Похабиху в 2024 г. (0.98 %) по сравнению с 2022 г. (1.75 %) обусловлены, вероятно, большей водностью реки. Наибольшие ГХВ сточных вод в речные (>10 %) характерны для (в %) Р (56-75), Cl (41-43), Na (28-36), Zr (11-25), К (16-24), Cs (13-22), Ga (10-21) и Ni (11-20), а также для Sb (39), As (19), Rb (16), Br (10) и Ti (10) в 2022 г. и для I (20) в 2024 г. СГХВ сточных вод в речные по всем информативным элементам в 2022 г. был 440 %, что в 1,4 раза больше, чем в 2024 г. (311 %). В 2024 г. влияние загрязнённых вод р. Похабихи в литорали Байкала прослеживалось на всех глубинах в радиусе ~ 100 м от устья, а фронтально по поверхности достигало 200 м. Субаквальная разгрузка загрязнённых речных вод обнаружена на удалении 65-80 м от устья. В 2022 г. исследовалась поверхностная вода в секторе ~ 50 м от устья и в прибрежной зоне до 90 м от устья, где влияние загрязнённых речных вод также было обнаружено. Литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабихи формируются, в основном, за счёт смешения двух главных источников – байкальских и чистых речных вод. ВВ сточных вод в 56-101 раз меньше ВВ речных вод и до трёх порядков меньше, чем ВВ байкальских вод. Геохимические вклады сточных вод в литорали Байкала более значимы, по сравнению с их водными вкладами. Основное влияние сточных вод здесь прослеживается по тем же элементам, что и для р. Похабихи, но с меньшими ГХВ (%): Р (3.7-64), Cl (2.9-35), Na (0.5-17), Zr (1.0-20), К (0.5-13), Cs (1.0-16), Ga (1.0-16), Rb (0.6-12), I (0.3-7.0), Ni (0.3-5.6), а также по некоторым другим элементам: Mn (3.9-8.9), Fe (0.7-3.8), Cr (0.5-4.8), Pb (0.5-2.9), Si (0.4-2.5) Ge (0.6-4.3) и В (0.3-4.6). Основной вклад в формирование геохимического состава литоральных вод Байкала вносят чистые речные и байкальские воды. За исключением Р ГХВ чистых речных вод в литорали Байкала во всех случаях были больше, чем ГХВ сточных вод (в 1.3-116 раз). Основное влияние чистых речных вод (ГХВ %) было по Mn (61-94), Fe (18-91), Si (16-94), Ga (30-85), REE (15-92), Pb (14-86), Y (17-87), Ge (11-80), Ti, Cr, Ba и Al (10-80). По остальным элементам максимальные ГХВ были менее 80 %, а минимальные ГХВ – менее 10 %. СГХВ чистых речных вод варьировали в интервале 189-3158 %, на всех станциях они были больше (в 6-12 раз) соответствующих СГХВ сточных вод. За исключением Р, Cl, Mn и Ga ГХВ байкальских вод во всех случаях были больше, чем ГХВ сточных вод (в 1.03-5760 раз). Максимальное влияние байкальских вод было по As, Sb, Mo, W, Ni, I, Li, U, Br, Zn и Na (ГХВ = 53-100 %). Высокие ГХВ (12-98 %) были также и для

Статья получена: 26.03.2025; исправлена: 28.03.2025; принята: 28.03.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Сутурин А.Н. Влияние водных источников на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал // Геоэкология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 61-99. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.61. EDN: CSWZAL

Article received: 26.03.2025; corrected: 28.03.2025; accepted: 28.03.2025.

FOR CITATION: Chebykin E.P., Kulikova N.N., Suturin A.N. The influence of water sources onto the Pokhabikha River and onto the adjacent littoral of Lake Baikal // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 61-99. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.61. EDN: CSWZAL

большинства других элементов: К, В, Sr, S, V, Al, Ti, Ca, Cs, Ga, Ge, Cu, Rb, Mg, Co, Ba, P, Zr, Cl, и Cr. ГХВ REE, Pb, Si, Fe, Si и Mn варьировали в интервале 0.3-85 %. СГХВ байкальских вод варьировали в интервале 1058-3092 %, на всех станциях они были больше (в 5-106 раз) соответствующих СГХВ сточных вод. В межгодовой динамике 2022 / 2024 гг. геохимические различия чистых вод р. Похабики, также как и сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г. Слюдянка по большинству химических элементов небольшие (<50 %). Более сильные различия (раз) по Cr (2.4), Ti (1.9), Ga (1.7) и Zr (1.7) в сточных водах, скорее всего, обусловлены вариациями тонкодисперсной взвеси. Существенные различия речных вод по Sb (6.1), Ni (3.2), P (2.4), Mn (2.1), Ga (1.8) и Al (1.6), вероятно, связаны с изменениями водности реки и влиянием других факторов (взвешенное вещество, физико-химические и биогеохимическими процессы). В сточных водах КОС г. Слюдянка обнаружено превышение нормативов по P (45-96 ПДК), Mn (4.7-5.6 ПДК), Fe (2.9 ПДК) и V (2.0-2.5 ПДК).

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

The Influence of Water Sources onto the Pokhabikha River and onto the Adjacent littoral of Lake Baikal

E.P. Chebykin, N.N. Kulikova, A.N. Sutorin

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The geochemical method has established the degree of influence of water sources on the Pokhabikha River and the adjacent littoral of Lake Baikal in 2022 and 2024. The water contributions (WC), geochemical contributions (GCC) and summary geochemical contributions (SGCC) of water sources (clean riverine water, wastewater and Baikalian waters) into mixing objects (Pokhabikha River at the mouth, littoral of Lake Baikal) have been determined. The lower WC from Slyudyanka City wastewater into the Pokhabikha River in 2024 (0.98 %) compared to 2022 (1.75 %) are probably due to the greater water content of the river. The highest GCC of wastewater into riverine waters (>10 %) is typical for (in %) P (56-75), Cl (41-43), Na (28-36), Zr (11-25), K (16-24), Cs (13-22), Ga (10-21) and Ni (11-20), as well as for Sb (39), As (19), Rb (16), Br (10) and Ti (10) in 2022 and for I (20) in 2024. For all informative elements, the SGCC into river waters in 2022 was 440 %, which is 1.4 times more than in 2024 (311 %). In 2024, the influence of polluted waters of the Pokhabikha River in Lake Baikal littoral was traced at all depths within a radius of ~ 100 m from the mouth, and frontally along the surface reached 200 m. Subaquatic discharge of polluted riverine waters was detected at a distance of 65-80 m from the mouth. In 2022, surface water was studied in the sector ~ 50 m from the mouth and in the coastal zone up to 90 m from the mouth, where the influence of polluted riverine waters was also detected. The littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the Pokhabikha River are formed mainly due to the mixing of two main sources – Baikalian and pure riverine waters. WC of wastewater are 56-101 times less than WC of riverine water and up to three orders of magnitude less than WC of Baikalian water. Geochemical contributions of wastewater to Lake Baikal littoral are more significant than their water contributions. The main effect of wastewater here can be traced to the same elements as for the Pokhabikha River, but with lower GCC (%): P (3.7-64), Cl (2.9-35), Na (0.5-17), Zr (1.0-20), K (0.5-13), Cs (1.0-16), Ga (1.0-16), Rb (0.6-12), I (0.3-7.0), Ni (0.3-5.6), as well as some other elements: Mn (3.9-8.9), Fe (0.7-3.8), Cr (0.5-4.8), Pb (0.5-2.9), Si (0.4-2.5) Ge (0.6-4.3) and B (0.3-4.6). The main contribution to the formation of the geochemical composition of the littoral waters of Lake Baikal is made by clean riverine and Baikalian waters. With the exception of P, the GSS of clean riverine waters in the Baikal littoral were in all cases higher than the GSS of wastewater (1.3-116 times). The main influence of clean riverine waters (GCC %) was by Mn (61-94), Fe (18-91), Si (16-94), Ga (30-85), REE (15-92), Pb (14-86), Y (17-87), Ge (11-80), Ti, Cr, Ba and Al (10-80). For the remaining elements, the maximal GSS were less than 80 %, and the minimal GSS were less than 10%. The SGCC of pure riverine waters varied in the range of 189-3158 %, at all stations they were 6-12 times higher than the corresponding SGCC of wastewater. With the exception of P, Cl, Mn and Ga, the GSS of Baikalian waters were in all cases higher than the GSS of wastewater (1.03-5760 times). The maximal effect of Baikalian waters

was by As, Sb, Mo, W, Ni, I, Li, U, Br, Zn and Na (GSS = 53--100%). High GSS (12-98%) were also found for most other elements: K, B, Sr, S, V, Al, Ti, Ca, Cs, Ga, Ge, Cu, Rb, Mg, Co, Ba, P, Zr, Cl, and Cr. GSS of FREE, Pb, Si, Fe, Si, and Mn ranged from 0.3 to 85 %. The GSS of Baikalian waters varied in the range of 1058-3092 %, at all stations they were higher (5-106 times) than the corresponding GSS of wastewater. In the interannual dynamics of 2022/2024, the geochemical differences in the clean waters of the Pokhabikha River, as well as the wastewater from the Slyudyanka City water treatment facilities (WTF), are small in most chemical elements (<50 %). The stronger differences (in times) by Cr (2.4), Ti (1.9), Ga (1.7), and Zr (1.7) in wastewater are most likely due to variations in fine suspension. Significant differences in riverine waters by Sb (6.1), Ni (3.2), P (2.4), Mn (2.1), Ga (1.8) and Al (1.6) are probably related to changes in river water content and the influence of other factors (suspended matter, physico-chemical and biogeochemical processes). In WTF waste waters from Severobaikalsk town, exceeding of regulations by P (45-96 MPC), Mn (4.7-5.6 MPC), Fe (2.9 PC) and V (2.0-2.5 MPC) was detected.

Keywords: wastewater, riverine waters, Baikalian waters, chemical elements, ICP-MS, maximal permissible concentrations, Lake Baikal

Введение

На побережье Байкала в последние годы активно проявляется экологический кризис: в литоральной зоне бурно развиваются нитчатые водоросли рода *Spirogira*, гибнут эндемичные байкальские губки, водные лишайники и другие гидробионты (Грачев, 2015; Ханаев и др., 2016; Сутурин и др., 2016). 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.

Ярким примером антропогенного воздействия на оз. Байкал является сброс сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г. Слюдянка в р. Похабику – малый приток оз. Байкал. КОС г. Слюдянка аккумулируют как промышленные, так и жилищно-коммунальные стоки и ежегодно сбрасывают около 1 млн м³ недостаточно очищенных сточных вод (Гагарина, 2016), что составляет около 2 % от стока реки, учитывая ее многолетний среднегодовой расход 1.5 м³/с (Автоматизированная..., 2023). Согласно Приказу Минприроды РФ № 83 (Приказ..., 2020) в сточных водах, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских

округов в пределах центральной и буферной экологических зон 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. Периодические исследования сточных вод КОС г. Слюдянки (в 2014, 2017 и 2020 гг.), проводимые нами в рамках бюджетных проектов ЛИН СО РАН, выявили постоянные превышения нормативов по P (26-38 ПДК), Mn (1.8-5,5 ПДК) и Cu (1.2-2 ПДК), и эпизодические по V (2-3 ПДК), Fe (1.2 ПДК) и Mo (1.5-1.9 ПДК). В 2022 г. превышения нормативов было обнаружено по P (45 ПДК), Mn (4.7 ПДК) и V (2 ПДК) (Чебыкин и др., 2024а). Кроме того, сточные воды КОС г. Слюдянки характеризуются плохими санитарно-микробиологическими показателями (энтерококки и *E. coli* > 40 000 КОЕ / 100 мл (Malnik et al., 2022)), что свидетельствует о неудовлетворительной работе очистных сооружений. По данным водолазных исследований (устное сообщение Ханаева И.В.) антропогенное влияние р. Похабики на литораль Байкала (нарушение растительных поясов, гибель эндемичных губок, развитие нитчатой водоросли рода *Spirogyra*) прослеживается как минимум на 100 м в сторону открытого Байкала напротив устья реки.

Ранее нами был разработан геохимический метод оценки степени влияния локальных источников на водные объекты (Чебыкин и др., 2024а,б; Чебыкин и др., 2025 (в печати)) с помощью которого оценены водные и геохимические вклады сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г.

Слюдянки в р. Похабихе и литоральной зоне оз. Байкал в зоне влияния загрязненных речных вод. В тот период (сентябрь 2022 г.) исследовались только поверхностные воды литорали (Чебыкин и др., 2024а). Было установлено, что водный вклад сточных вод КОС г. Слюдянки в общий речной сток р. Похабиха был 1.75 %, а влияние загрязнённых речных вод в литорали распространяется далее 90 м по берегу и за пределы 50 м зоны фронтально устью. В данной работе мы расширили зону обследования в литорали до 500 м от устья с отбором проб по глубине (поверхностные, срединные и придонные воды).

Цель данного исследования – определить степень влияния водных источников на р. Похабиху и прилегающую литораль оз. Байкал по водным и геохимическим характеристикам. Провести расширенное исследование водной толщи литорали Байкала в зоне влияния загрязнённых вод р. Похабихи (с отбором проб поверхностных, придонных и срединных вод). Определить водные вклады (ВВ), геохимические вклады (ГХВ) и суммарные геохимические вклады (СГХВ) источников (чистые речные, сточные и байкальские воды) в объекты смешения (р. Похабиха в устье, литораль Байкала). Сравнить полученные данные с результатами исследования сточных вод КОС г. Слюдянки, р. Похабихи и прилегающей литорали Байкала в 2022 г.

1. Материалы и методы

1.1. Описание района работ, отбор и фиксация проб

Город Слюдянка расположен на юго-западном окончании оз. Байкал (рис. 1). Это довольно крупный районный центр с населением ~18 тыс. человек (на 2020 г., (Итоги..., 2020)). Сточные воды КОС г. Слюдянки сбрасываются в небольшой приток Байкала – р. Похабиху в 500 м от берега озера (см. рис. 1). Согласно данным Государственного водного реестра (Поиск...), длина р. Похабиха составляет 20 км, площадь водосборного бассейна – 64.4 км². В базе данных (R-ArcticNet...) представлены среднемесячные расход воды р. Похабиха за 49 лет (с 1951 по 1999 гг.) в створе 2.2 км выше устья. Согласно этим данным,

наиболее низкие расходы воды приходится на зимне-весенний период (январь-апрель: 0.97-0.73 м³/с), наиболее высокие – на летне-осенний (июль – 2.24, август – 2.60, сентябрь – 2.45 м³/с), а многолетний среднегодовой расход составляет 1.49 м³/с. По данным Федерального агентства водных ресурсов (Автоматизированная..., 2023) средние показатели расхода воды р. Похабихи за период 2008-2021 гг. практически не изменились: наиболее низкие расходы приходится на январь-апрель (0.95-0.69 м³/с), наиболее высокие – на июль (2.01 м³/с), август (2.50 м³/с) и сентябрь (2.39 м³/с), многолетний среднегодовой расход составил 1.50 м³/с.

Отбор проб произведён 01 августа 2024 г. в ходе кругобайкальской экспедиции на НИС «Академик В.А. Коптюг». Координаты станций отбора проб, глубина и температура воды представлены в табл. 1, местоположение станций показаны на рис. 1. Проба сточных вод (ст. WW) была отобрана непосредственно из трубы сброса. Пробы речной воды были взяты в ~ 100 м выше трубы сброса сточных вод (ст. Riv(up)) и в приустьевом участке (ст. Riv) перед небольшим озером, перекрытым дамбой у самого берега Байкала. Интерстициальная вода (ст. Riv(h)) отобрана у левого берега р. Похабиха вблизи дамбы. Прибрежные воды (~ 1 м от уреза) отбирали напротив устья (ст. RivCW), и латерально от него 40 и 100 м влево (ст. 40LCW, ст. 100LCW) и 100 м вправо (ст. 100RCW). В литорали в радиусе 100 м от устья были отобраны образцы поверхностной, придонной и срединной воды (с помощью водолазов) на станциях 100R, 65, 80, 50L, 100, 100L, где цифры обозначают расстояние от устья (ст. RivCW), а индексы L и R – угловое направление (влево и вправо, соответственно) от линии, перпендикулярной берегу. Станции без индексов – напротив устья вблизи линии перпендикулярной берегу. В более удалённых секторах отобраны образцы поверхностной, придонной и срединной воды на станциях 200, 330R, 310 и 550L. Фоновая проба байкальской воды была взята из фотического слоя (усреднённая с горизонтов 0, 5, 10, 15, 20 и 25 м) в 3 км от берега (ст. 3к). Образцы воды из фотического слоя и с более глубоких

горизонтов (50, 100, 200 м) 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. Фоновые литоральные пробы были

отобраны вблизи посёлка Сухой ручей в 6,5 км от устья р. Похабихи: интерстициальная вода на ст. SR(h), прибрежная на ст. SRCW, поверхностная, придонная и срединная на ст. SR на расстоянии 255 м от уреза (глубина 11.4 м).

Т а б л и ц а 1

Координаты станций отбора, физико-химические характеристики, геохимический состав (мкг/дм³) и общая минерализация (ОМ, мг/дм³) водных объектов в зоне влияния КОС г. Слюдянки и в фоновых районах. В скобках указаны ошибки определения (отн. %)

Table 1

Coordinates of sampling stations, physico-chemical characteristics, geochemical composition (µg/dm³) and total mineralization (ОМ, mg/dm³) of water bodies in the area of influence of Slyudyanka City water treatment facilities (WTF) and in the background areas. The definition errors (relative %) are shown in parentheses.

Станция *	N	E	Глубина, м	t, °C	pH	Li	B	Na	Mg
Riv(up)	N51.6707°	E103.7011°	0	7	8.13	0.85 (5)	4.2 (5)	1360 (5)	7000 (5)
WW	N51.6709°	E103.7027°	0	16.2	7.354	4.6 (5)	47 (5)	48000 (5)	12700 (5)
Riv	N51.6720°	E103.7085°	0	8.6	7.983	0.93 (5)	6.5 (5)	1680 (5)	7300 (5)
Riv(h)	N51.6725°	E103.7095°	0.2	нд	7.613	2.3 (5)	10.6 (5)	2600 (5)	6200 (5)
100RCW	N51.6716°	E103.7102°	0	нд	8.996	1.9 (5)	6.9 (5)	3400 (5)	4300 (5)
RivCW	N51.6724°	E103.7097°	0	нд	8.323	1.36 (5)	7 (5)	2400 (5)	6000 (5)
40LCW	N51.6727°	E103.7094°	0	нд	8.91	2.1 (5)	7.5 (5)	3700 (5)	4700 (5)
100LCW	N51.6732°	E103.7090°	0	нд	8.464	2 (5)	7.1 (5)	3500 (5)	4800 (5)
100R(s)	N51.6719°	E103.7109°	0	нд	8.48	2 (5)	6.1 (5)	3400 (5)	3700 (5)
100R(m)	N51.6719°	E103.7109°	0.9	нд	8.665	2 (5)	6 (5)	3500 (5)	3700 (5)
100R(b)	N51.6719°	E103.7109°	1.8	11	8.552	2.1 (5)	6.3 (5)	3600 (5)	3700 (5)
65(s)	N51.6724°	E103.7106°	0	нд	8.42	2 (5)	6.3 (5)	3500 (5)	3600 (5)
65(m)	N51.6724°	E103.7106°	0.9	нд	8.356	1.88 (5)	6.1 (5)	3300 (5)	4000 (5)
65(b)	N51.6724°	E103.7106°	1.8	12	8.141	1.63 (5)	6.6 (5)	2900 (5)	5000 (5)
80L(s)	N51.6728°	E103.7105°	0	нд	8.403	2 (5)	6.1 (5)	3500 (5)	3700 (5)
80L(m)	N51.6728°	E103.7105°	1	нд	8.107	1.55 (5)	6.3 (5)	2900 (5)	5000 (5)
80L(b)	N51.6728°	E103.7105°	2	11	7.992	1.32 (5)	6.4 (5)	2500 (5)	5900 (5)
50L(s)	N51.6728°	E103.7100°	0	нд	8.276	1.9 (5)	6 (5)	3300 (5)	3800 (5)
50L(m)	N51.6728°	E103.7100°	0.9	нд	8.285	1.69 (5)	6.4 (5)	3000 (5)	4700 (5)
50L(b)	N51.6728°	E103.7100°	1.8	12	8.42	1.88 (5)	6.3 (5)	3300 (5)	4000 (5)
100(s)	N51.6727°	E103.7110°	0	нд	8.438	1.88 (5)	6.1 (5)	3300 (5)	3600 (5)
100(m)	N51.6727°	E103.7110°	1.2	нд	8.35	1.78 (5)	5.9 (5)	3100 (5)	4300 (5)
100(b)	N51.6727°	E103.7110°	2.4	10	8.51	1.89 (5)	6 (5)	3300 (5)	4000 (5)
100L(s)	N51.6732°	E103.7102°	0	нд	8.375	1.9 (5)	6.2 (5)	3300 (5)	3900 (5)
100L(m)	N51.6732°	E103.7102°	1.4	нд	8.383	2 (5)	6.1 (5)	3400 (5)	3900 (5)
100L(b)	N51.6732°	E103.7102°	2.8	7	8.6	2.2 (5)	6 (5)	3700 (5)	3500 (5)
200(s)	N51.6730°	E103.7124°	0	нд	8.354	1.9 (5)	6 (5)	3500 (5)	3600 (5)
200(m)	N51.6730°	E103.7124°	2.3	нд	8.234	2.1 (5)	6 (5)	3800 (5)	3400 (5)
200(b)	N51.6730°	E103.7124°	4.6	4	8.305	2.1 (5)	6.2 (5)	3700 (5)	3400 (5)
330R(s)	N51.6713°	E103.7141°	0	нд	8.41	2 (5)	6.2 (5)	3400 (5)	3900 (5)
330R(m)	N51.6713°	E103.7141°	6	нд	8.264	2.2 (5)	6 (5)	3700 (5)	3400 (5)
330R(b)	N51.6713°	E103.7141°	12.6	5	7.968	2.2 (5)	5.9 (5)	3700 (5)	3400 (5)
310(s)	N51.6726°	E103.7141°	0	нд	8.488	2.1 (5)	6 (5)	3600 (5)	3500 (5)
310(m)	N51.6726°	E103.7141°	5	нд	8.355	2.1 (5)	5.9 (5)	3700 (5)	3300 (5)
310(b)	N51.6726°	E103.7141°	12.2	6	8.152	2.2 (5)	6.1 (5)	3800 (5)	3400 (5)
550L(s)	N51.6763°	E103.7145°	0	нд	8.326	2 (5)	6 (5)	3500 (5)	3600 (5)

550L(m)	N51.6763°	E103.7145°	5	нд	8.176	2.2 (5)	5.9 (5)	3700 (5)	3300 (5)
550L(b)	N51.6763°	E103.7145°	10	6	8.061	2.1 (5)	5.8 (5)	3700 (5)	3400 (5)
SR(s)	N51.6383°	E103.7862°	0	9.5	8.39	2.1 (5)	5.8 (5)	3600 (5)	3300 (5)
SR(m)	N51.6383°	E103.7862°	5.6	нд	8.325	2.2 (5)	5.9 (5)	3700 (5)	3400 (5)
SR(b)	N51.6383°	E103.7862°	11.4	4	7.949	2.1 (5)	6.1 (5)	3700 (5)	3300 (5)
SRCW	N51.6375°	E103.7828°	0	нд	7.92	2 (5)	6.3 (5)	3600 (5)	3400 (5)
SR(h)	N51.6375°	E103.7828°	0.2	нд	6.868	1.77 (5)	18.5 (5)	2600 (5)	4900 (5)
3k	N51.6826°	E103.7492°	0-25	15.5	8.233	2.1 (1.7)	6 (1.7)	3730 (1.7)	3356 (1.7)

Примечание * - описание станций отбора в тексте, (s) – поверхностная вода, (m) – срединная вода, (b) – придонная вода.

Note * - description of sampling stations in the text, (s) – surface water, (m) – middle water, (b) – bottom water.

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V
Riv(up)	5700 (5)	33 (5)	3400 (5)	590 (5)	700 (5)	31000 (5)	0.3 (10)	0.56 (5)
WW	8900 (5)	4800 (5)	9900 (5)	48000 (5)	12700 (5)	51000 (5)	1.17 (6.4)	2.5 (5)
Riv	5600 (5)	65 (5)	3200 (5)	1140 (5)	790 (5)	31000 (5)	0.35 (9.6)	0.58 (5)
Riv(h)	4500 (5)	75 (5)	3200 (5)	1230 (5)	1760 (5)	39000 (5)	0.91 (7)	1.59 (5)
100RCW	1220 (5)	23 (5)	2200 (5)	680 (5)	1000 (5)	20000 (5)	0.18 (12)	0.45 (5)
RivCW	3600 (5)	37 (5)	2700 (5)	960 (5)	870 (5)	26000 (5)	0.27 (10)	0.55 (5)
40LCW	1340 (5)	18.8 (5)	2600 (5)	780 (5)	1090 (5)	22000 (5)	0.2 (11)	0.51 (5)
100LCW	1730 (5)	20 (5)	2300 (5)	990 (5)	1130 (5)	24000 (5)	0.2 (12)	0.43 (5)
100R(s)	730 (5)	12.4 (5)	2100 (5)	600 (5)	990 (5)	17500 (5)	0.16 (12)	0.38 (5)
100R(m)	700 (5)	11.7 (5)	1900 (5)	660 (5)	990 (5)	17900 (5)	0.15 (13)	0.42 (5)
100R(b)	640 (5)	16.5 (5)	2200 (5)	590 (5)	990 (5)	18200 (5)	0.19 (12)	0.52 (5)
65(s)	730 (5)	37 (5)	2100 (5)	600 (5)	1010 (5)	17200 (5)	0.22 (11)	0.4 (5)
65(m)	1070 (5)	23 (5)	2200 (5)	620 (5)	970 (5)	18700 (5)	0.17 (12)	0.42 (5)
65(b)	2400 (5)	34 (5)	2500 (5)	870 (5)	940 (5)	23000 (5)	0.22 (11)	0.63 (5)
80L(s)	680 (5)	18 (5)	2300 (5)	620 (5)	980 (5)	17600 (5)	0.14 (13)	0.4 (5)
80L(m)	2500 (5)	40 (5)	2600 (5)	910 (5)	920 (5)	23000 (5)	0.19 (12)	0.59 (5)
80L(b)	3600 (5)	48 (5)	2700 (5)	1120 (5)	900 (5)	26000 (5)	0.24 (11)	0.72 (5)
50L(s)	950 (5)	16.5 (5)	2100 (5)	590 (5)	940 (5)	17900 (5)	0.13 (13)	0.42 (5)
50L(m)	1900 (5)	26 (5)	2400 (5)	800 (5)	930 (5)	22000 (5)	0.2 (12)	0.48 (5)
50L(b)	1130 (5)	17.6 (5)	1900 (5)	640 (5)	950 (5)	19000 (5)	0.19 (12)	0.44 (5)
100(s)	830 (5)	35 (5)	2100 (5)	620 (5)	970 (5)	17300 (5)	0.18 (12)	0.4 (5)
100(m)	1650 (5)	25 (5)	2200 (5)	730 (5)	940 (5)	20000 (5)	0.19 (12)	0.46 (5)
100(b)	1090 (5)	25 (5)	2100 (5)	640 (5)	950 (5)	19000 (5)	0.17 (12)	0.48 (5)
100L(s)	1140 (5)	39 (5)	2300 (5)	700 (5)	980 (5)	18600 (5)	0.15 (13)	0.43 (5)
100L(m)	970 (5)	21 (5)	2200 (5)	670 (5)	980 (5)	18900 (5)	0.16 (12)	0.44 (5)
100L(b)	280 (5)	15.9 (5)	2000 (5)	600 (5)	990 (5)	17300 (5)	0.12 (14)	0.44 (5)
200(s)	770 (5)	15.8 (5)	2200 (5)	630 (5)	990 (5)	17100 (5)	0.1 (15)	0.4 (5)
200(m)	250 (5)	18.6 (5)	2200 (5)	640 (5)	1020 (5)	16900 (5)	0.19 (12)	0.41 (5)
200(b)	185 (5)	25 (5)	2200 (5)	590 (5)	1020 (5)	17100 (5)	0.14 (13)	0.4 (5)
330R(s)	950 (5)	11.7 (5)	2100 (5)	690 (5)	1000 (5)	18400 (5)	0.21 (11)	0.42 (5)
330R(m)	240 (5)	13 (5)	2100 (5)	620 (5)	1030 (5)	16800 (5)	0.1 (14)	0.4 (5)
330R(b)	103 (5)	23 (5)	2400 (5)	600 (5)	1020 (5)	16900 (5)	0.09 (15)	0.39 (5)
310(s)	660 (5)	40 (5)	2000 (5)	650 (5)	1020 (5)	17000 (5)	0.15 (13)	0.4 (5)
310(m)	190 (5)	23 (5)	2200 (5)	600 (5)	1010 (5)	16400 (5)	0.07 (16)	0.39 (5)
310(b)	85 (5)	17 (5)	2200 (5)	610 (5)	1020 (5)	16800 (5)	0.09 (15)	0.39 (5)
550L(s)	810 (5)	34 (5)	2000 (5)	640 (5)	990 (5)	17200 (5)	0.16 (12)	0.4 (5)
550L(m)	330 (5)	16.6 (5)	2000 (5)	580 (5)	990 (5)	16200 (5)	0.15 (13)	0.39 (5)
550L(b)	176 (5)	12.5 (5)	2100 (5)	600 (5)	1010 (5)	16600 (5)	0.1 (15)	0.41 (5)
SR(s)	350 (5)	14.4 (5)	2000 (5)	710 (5)	1000 (5)	16300 (5)	0.13 (13)	0.39 (5)
SR(m)	360 (5)	6.7 (5)	1860 (5)	650 (5)	1010 (5)	16600 (5)	0.12 (14)	0.39 (5)
SR(b)	99 (5)	19 (5)	2200 (5)	620 (5)	1020 (5)	16400 (5)	0.1 (15)	0.38 (5)
SRCW	460 (5)	21 (5)	2000 (5)	660 (5)	1060 (5)	16800 (5)	0.19 (12)	0.41 (5)
SR(h)	3900 (5)	65 (5)	1090 (5)	1090 (5)	2600 (5)	26000 (5)	1.9 (5.5)	1.01 (5)
3k	335 (1.8)	15.6 (1.8)	2060 (1.8)	624 (1.7)	1016 (1.7)	16440 (1.7)	0.12 (4.9)	0.39 (1.7)

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Ga
Riv(up)	0.56 (5)	0.23 (8.9)	6.2 (5)	15.6 (5)	0.098 (5.8)	0.12 (8.9)	0.3 (4.9)	0.007 (17)
WW	2.5 (5)	0.4 (7.4)	56 (5)	290 (5)	0.61 (5)	1.31 (5)	0.61 (5)	0.082 (7.4)

Riv	0.58 (5)	0.23 (8.9)	12.4 (5)	71 (5)	0.135 (5.2)	0.12 (8.8)	0.31 (4.9)	0.008 (16)
Riv(h)	1.59 (5)	0.23 (9)	4.9 (5)	51 (5)	0.155 (5)	0.69 (4.9)	2.7 (5)	0.036 (9.7)
100RCW	0.45 (5)	0.09 (12)	13.8 (5)	80 (5)	0.072 (6.4)	0.22 (7.2)	0.24 (5.3)	0.0047 (19)
RivCW	0.55 (5)	0.19 (9.6)	11.8 (5)	74 (5)	0.095 (5.8)	0.18 (7.7)	0.23 (5.3)	0.005 (18)
40LCW	0.51 (5)	0.12 (11)	15.1 (5)	94 (5)	0.082 (6.1)	0.25 (6.9)	0.26 (5.2)	0.005 (18)
100LCW	0.43 (5)	0.16 (10)	23 (5)	130 (5)	0.098 (5.8)	0.23 (7.1)	0.26 (5.2)	0.006 (18)
100R(s)	0.38 (5)	0.1 (12)	3.1 (5)	15 (5)	0.052 (7.2)	0.2 (7.4)	0.21 (5.5)	0.0011 (31)
100R(m)	0.42 (5)	0.1 (12)	2.3 (5)	6.3 (5)	0.056 (7)	0.16 (8)	0.2 (5.6)	0.0014 (28)
100R(b)	0.52 (5)	0.1 (12)	8.4 (5)	9.4 (5)	0.068 (6.5)	0.16 (8)	0.26 (5.1)	0.0049 (19)
65(s)	0.4 (5)	0.09 (12)	2.4 (5)	10.8 (5)	0.05 (7.2)	0.19 (7.5)	0.26 (5.2)	0.0028 (22)
65(m)	0.42 (5)	0.1 (12)	3.1 (5)	10.5 (5)	0.06 (6.8)	0.18 (7.8)	0.21 (5.6)	0.0031 (22)
65(b)	0.63 (5)	0.17 (9.9)	8.6 (5)	30 (5)	0.084 (6.1)	0.14 (8.3)	0.22 (5.4)	0.006 (18)
80L(s)	0.4 (5)	0.08 (13)	2 (5)	9.2 (5)	0.051 (7.2)	0.19 (7.6)	0.24 (5.3)	0.0029 (22)
80L(m)	0.59 (5)	0.17 (9.9)	7.4 (5)	32 (5)	0.079 (6.2)	0.16 (8)	0.22 (5.5)	0.006 (17)
80L(b)	0.72 (5)	0.23 (9)	9.4 (5)	45 (5)	0.092 (5.9)	0.17 (7.9)	0.21 (5.5)	0.007 (17)
50L(s)	0.42 (5)	0.1 (12)	2.5 (5)	10.4 (5)	0.053 (7.1)	0.18 (7.6)	0.28 (5.1)	0.0021 (25)
50L(m)	0.48 (5)	0.13 (11)	6.8 (5)	25 (5)	0.072 (6.4)	0.18 (7.7)	0.21 (5.6)	0.0035 (21)
50L(b)	0.44 (5)	0.11 (11)	5.7 (5)	15.3 (5)	0.06 (6.8)	0.17 (7.8)	0.21 (5.6)	0.0035 (21)
100(s)	0.4 (5)	0.12 (11)	1.84 (5)	9.1 (5)	0.049 (7.3)	0.15 (8.2)	0.24 (5.3)	0.0033 (21)
100(m)	0.46 (5)	0.11 (11)	4.7 (5)	18.8 (5)	0.061 (6.8)	0.19 (7.6)	0.23 (5.4)	0.0025 (23)
100(b)	0.48 (5)	0.09 (12)	5.2 (5)	11.4 (5)	0.066 (6.6)	0.19 (7.5)	0.25 (5.2)	0.0037 (21)
100L(s)	0.43 (5)	0.09 (12)	3.7 (5)	24 (5)	0.057 (6.9)	0.23 (7.1)	0.24 (5.3)	0.0018 (26)
100L(m)	0.44 (5)	0.09 (12)	3.4 (5)	18 (5)	0.053 (7.1)	0.16 (8)	0.21 (5.5)	0.0024 (24)
100L(b)	0.44 (5)	0.08 (13)	2.3 (5)	9.8 (5)	0.048 (7.3)	0.15 (8.2)	0.21 (5.6)	0.0025 (24)
200(s)	0.4 (5)	0.1 (12)	0.81 (5)	7.8 (5)	0.044 (7.6)	0.17 (7.9)	0.25 (5.2)	0.0012 (30)
200(m)	0.41 (5)	0.12 (11)	0.52 (5)	9.6 (5)	0.05 (7.2)	0.23 (7.1)	0.2 (5.6)	0.0022 (24)
200(b)	0.4 (5)	0.08 (13)	1.52 (5)	7.8 (5)	0.049 (7.3)	0.21 (7.3)	0.23 (5.4)	0.0017 (26)
330R(s)	0.42 (5)	0.12 (11)	2.4 (5)	18 (5)	0.057 (6.9)	0.17 (7.8)	0.2 (5.6)	0.0028 (22)
330R(m)	0.4 (5)	0.08 (13)	0.28 (5)	5.7 (5.2)	0.044 (7.6)	0.21 (7.4)	0.18 (5.8)	0.0008 (34)
330R(b)	0.39 (5)	0.08 (13)	0.36 (5)	7 (4.8)	0.052 (7.1)	0.26 (6.8)	0.22 (5.4)	0.0016 (27)
310(s)	0.4 (5)	0.09 (12)	1.1 (5)	11.7 (5)	0.044 (7.5)	0.2 (7.4)	0.24 (5.3)	0.002 (25)
310(m)	0.39 (5)	0.062 (14)	0.153 (5)	5.4 (5.3)	0.045 (7.5)	0.2 (7.4)	0.19 (5.8)	0.0014 (29)
310(b)	0.39 (5)	0.067 (13)	0.72 (5)	7.1 (4.8)	0.046 (7.4)	0.14 (8.3)	2 (5)	0.001 (32)
550L(s)	0.4 (5)	0.1 (12)	1.47 (5)	12.2 (5)	0.045 (7.5)	0.21 (7.3)	0.26 (5.2)	0.0026 (23)
550L(m)	0.39 (5)	0.07 (13)	0.097 (5.3)	4.8 (5.5)	0.045 (7.5)	0.26 (6.8)	0.29 (5)	0.001 (31)
550L(b)	0.41 (5)	0.14 (11)	0.43 (5)	6.4 (5)	0.046 (7.4)	0.22 (7.2)	0.21 (5.6)	0.0015 (28)
SR(s)	0.39 (5)	0.09 (12)	0.34 (5)	10.7 (5)	0.041 (7.7)	0.33 (6.3)	0.77 (5)	0.0018 (26)
SR(m)	0.39 (5)	0.09 (12)	0.28 (5)	9.3 (5)	0.046 (7.4)	0.18 (7.7)	0.36 (5)	0.0008 (34)
SR(b)	0.38 (5)	0.11 (11)	0.19 (5)	8.5 (5)	0.054 (7)	0.19 (7.6)	0.26 (5.1)	0.0005 (39)
SRCW	0.41 (5)	0.13 (11)	13.4 (5)	52 (5)	0.098 (5.8)	0.26 (6.8)	0.4 (5)	0.0016 (27)
SR(h)	1.01 (5)	0.45 (7.2)	168 (5)	270 (5)	0.8 (5)	1.66 (5)	3.4 (5)	0.018 (12)
3k	0.39 (1.7)	0.082 (4.5)	0.068 (2.4)	5.2 (2)	0.046 (2.5)	0.19 (2.7)	0.23 (2.2)	0.00064 (14)

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	Ge	As	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Mo
Riv(up)	0.007 (21)	0.063 (14)	4.1 (5.7)	1.12 (5)	122 (5)	0.025 (7.5)	0.0048 (17)	0.29 (5.5)
WW	0.036 (12)	0.51 (6.9)	28 (5)	10.5 (5)	155 (5)	0.064 (5.5)	0.075 (6.7)	0.7 (5)
Riv	0.007 (21)	0.06 (14)	4.5 (5.5)	1.23 (5)	124 (5)	0.025 (7.5)	0.007 (15)	0.28 (5.6)
Riv(h)	0.035 (12)	0.6 (6.5)	6.8 (4.8)	2.2 (5)	185 (5)	0.052 (5.9)	0.021 (10)	0.77 (5)
100RCW	0.005 (23)	0.34 (7.8)	8.5 (5)	0.76 (5)	116 (5)	0.012 (9.5)	0.0032 (19)	1.19 (5)
RivCW	0.004 (25)	0.17 (9.9)	6.4 (4.9)	0.98 (5)	121 (5)	0.022 (7.9)	0.0045 (17)	0.68 (5)
40LCW	0.006 (22)	0.4 (7.4)	9.1 (5)	0.81 (5)	126 (5)	0.013 (9.4)	0.004 (18)	1.33 (5)
100LCW	0.002 (50)	0.32 (8)	8.7 (5)	1.04 (5)	131 (5)	0.013 (9.2)	0.0047 (17)	1.14 (5)
100R(s)	0.0035 (26)	0.34 (7.8)	8.6 (5)	0.67 (5)	110 (5)	0.0073 (11)	0.0042 (17)	1.26 (5)
100R(m)	0.0029 (28)	0.37 (7.6)	9 (5)	0.67 (5)	112 (5)	0.0069 (11)	0.0026 (21)	1.3 (5)
100R(b)	0.002 (32)	0.38 (7.6)	9.1 (5)	0.68 (5)	113 (5)	0.011 (9.9)	0.0041 (18)	1.28 (5)
65(s)	0.0023 (30)	0.36 (7.7)	8.9 (5)	0.68 (5)	109 (5)	0.017 (8.5)	0.0046 (17)	1.28 (5)
65(m)	0.002 (50)	0.31 (8.1)	8.4 (5)	0.72 (5)	112 (5)	0.011 (9.9)	0.0042 (17)	1.21 (5)
65(b)	0.004 (25)	0.23 (8.9)	7.7 (5)	0.89 (5)	118 (5)	0.014 (9.1)	0.0035 (19)	0.97 (5)
80L(s)	0.0026 (29)	0.36 (7.7)	8.8 (5)	0.67 (5)	110 (5)	0.0071 (11)	0.0039 (18)	1.27 (5)
80L(m)	0.0028 (28)	0.24 (8.8)	7.3 (5)	0.89 (5)	116 (5)	0.009 (10)	0.003 (20)	0.89 (5)
80L(b)	0.007 (21)	0.18 (9.6)	6.4 (4.9)	1.04 (5)	120 (5)	0.014 (9.1)	0.0047 (17)	0.7 (5)
50L(s)	0.0032 (27)	0.34 (7.9)	8.8 (5)	0.7 (5)	110 (5)	0.0089 (11)	0.0035 (18)	1.2 (5)
50L(m)	0.006 (22)	0.28 (8.4)	7.9 (5)	0.82 (5)	117 (5)	0.011 (9.8)	0.0043 (17)	1.04 (5)
50L(b)	0.004 (25)	0.35 (7.7)	8.6 (5)	0.73 (5)	113 (5)	0.01 (10)	0.0047 (17)	1.2 (5)
100(s)	0.005 (23)	0.34 (7.8)	8.9 (5)	0.69 (5)	109 (5)	0.017 (8.4)	0.0049 (17)	1.26 (5)
100(m)	0.0031 (27)	0.3 (8.2)	8.2 (5)	0.78 (5)	113 (5)	0.012 (9.5)	0.0038 (18)	1.07 (5)
100(b)	0.0026 (29)	0.32 (8)	8.7 (5)	0.74 (5)	114 (5)	0.01 (10)	0.0059 (16)	1.18 (5)
100L(s)	0.0035 (26)	0.33 (7.9)	8.8 (5)	0.7 (5)	110 (5)	0.02 (8)	0.0049 (17)	1.17 (5)

100L(m)	0.0036 (26)	0.36 (7.7)	8.9 (5)	0.69 (5)	113 (5)	0.012 (9.6)	0.0023 (21)	1.25 (5)
100L(b)	0.004 (26)	0.39 (7.5)	9.5 (5)	0.64 (5)	112 (5)	0.0083 (11)	0.0021 (22)	1.39 (5)
200(s)	0.002 (50)	0.35 (7.7)	9.7 (5)	0.62 (5)	108 (5)	0.015 (8.8)	0.005 (16)	1.3 (5)
200(m)	0.0026 (29)	0.39 (7.5)	10 (5)	0.65 (5)	112 (5)	0.0081 (11)	0.0053 (16)	1.37 (5)
200(b)	0.0022 (31)	0.39 (7.5)	9.5 (5)	0.64 (5)	112 (5)	0.0062 (12)	0.0026 (20)	1.34 (5)
330R(s)	0.0033 (27)	0.34 (7.9)	9 (5)	0.67 (5)	111 (5)	0.0067 (12)	0.0033 (19)	1.24 (5)
330R(m)	0.002 (50)	0.39 (7.5)	10 (5)	0.64 (5)	111 (5)	0.0045 (13)	0.0026 (20)	1.41 (5)
330R(b)	0.002 (50)	0.35 (7.8)	9.6 (5)	0.63 (5)	112 (5)	0.006 (12)	0.0033 (19)	1.38 (5)
310(s)	0.002 (50)	0.33 (7.9)	9.8 (5)	0.66 (5)	108 (5)	0.013 (9.4)	0.0051 (16)	1.3 (5)
310(m)	0.002 (50)	0.39 (7.5)	9.6 (5)	0.62 (5)	111 (5)	0.0082 (11)	0.0044 (17)	1.36 (5)
310(b)	0.0017 (34)	0.38 (7.6)	9.9 (5)	0.62 (5)	111 (5)	0.0054 (12)	0.0029 (20)	1.34 (5)
550L(s)	0.002 (50)	0.33 (7.9)	9.8 (5)	0.68 (5)	107 (5)	0.014 (9)	0.0049 (17)	1.26 (5)
550L(m)	0.0027 (29)	0.38 (7.6)	9.8 (5)	0.62 (5)	109 (5)	0.0069 (11)	0.0059 (16)	1.32 (5)
550L(b)	0.0019 (32)	0.36 (7.7)	9.5 (5)	0.63 (5)	110 (5)	0.0053 (13)	0.0036 (18)	1.37 (5)
SR(s)	0.002 (50)	0.36 (7.7)	10.8 (5)	0.63 (5)	109 (5)	0.0057 (12)	0.0053 (16)	1.33 (5)
SR(m)	0.002 (50)	0.38 (7.6)	10.3 (5)	0.63 (5)	110 (5)	0.005 (13)	0.0038 (18)	1.36 (5)
SR(b)	0.002 (50)	0.39 (7.5)	10.1 (5)	0.63 (5)	111 (5)	0.0042 (13)	0.001 (50)	1.37 (5)
SRCW	0.0036 (26)	0.38 (7.6)	10 (5)	0.68 (5)	110 (5)	0.0085 (11)	0.0035 (19)	1.31 (5)
SR(h)	0.032 (13)	0.4 (7.4)	12.7 (5)	3.3 (5)	143 (5)	0.08 (5.1)	0.026 (9.5)	0.71 (5)
3k	0.0021 (16)	0.39 (2.5)	10.1 (1.7)	0.62 (1.7)	110 (1.7)	0.0048 (4.9)	0.0026 (7.8)	1.36 (1.7)

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	Sb	I	Cs	Ba	La	Ce	W	U
Riv(up)	0.055 (9.4)	0.83 (5.1)	0.0039 (14)	28 (5)	0.0073 (11)	0.0068 (11)	0.014 (13)	0.26 (5)
WW	0.4 (4.9)	19 (5)	0.045 (6.3)	25 (5)	0.015 (8.7)	0.022 (7.7)	0.022 (11)	0.42 (5)
Riv	0.2 (6.1)	0.94 (4.9)	0.0034 (15)	29 (5)	0.01 (9.9)	0.011 (9.5)	0.013 (14)	0.26 (5)
Riv(h)	0.55 (5)	1.47 (5)	0.0048 (13)	39 (5)	0.032 (6.7)	0.056 (5.6)	0.065 (8)	0.54 (5)
100RCW	0.17 (6.5)	2.7 (5)	0.0021 (17)	12.8 (5)	0.0068 (11)	0.0078 (11)	0.048 (8.8)	0.52 (5)
RivCW	0.16 (6.6)	1.64 (5)	0.003 (15)	21 (5)	0.0078 (11)	0.011 (9.8)	0.028 (10)	0.36 (5)
40LCW	0.19 (6.3)	2.9 (5)	0.0021 (17)	14 (5)	0.007 (11)	0.008 (11)	0.048 (8.8)	0.56 (5)
100LCW	0.19 (6.3)	2.6 (5)	0.003 (15)	18.6 (5)	0.0078 (11)	0.0077 (11)	0.043 (9.1)	0.55 (5)
100R(s)	0.15 (6.8)	2.5 (5)	0.0022 (17)	11.8 (5)	0.0038 (14)	0.0042 (13)	0.041 (9.3)	0.52 (5)
100R(m)	0.16 (6.7)	2.6 (5)	0.0017 (18)	11.9 (5)	0.0047 (13)	0.0039 (14)	0.045 (9)	0.53 (5)
100R(b)	0.19 (6.2)	2.6 (5)	0.002 (17)	11.3 (5)	0.0061 (12)	0.007 (11)	0.051 (8.6)	0.53 (5)
65(s)	0.18 (6.3)	3.3 (5)	0.0013 (20)	10.8 (5)	0.0048 (13)	0.0043 (13)	0.044 (9)	0.51 (5)
65(m)	0.19 (6.3)	2.6 (5)	0.0021 (17)	13 (5)	0.0046 (13)	0.004 (14)	0.045 (9)	0.51 (5)
65(b)	0.16 (6.5)	2.2 (5)	0.003 (15)	17 (5)	0.0049 (12)	0.0061 (12)	0.039 (9.4)	0.44 (5)
80L(s)	0.16 (6.6)	2.8 (5)	0.0017 (18)	10.8 (5)	0.004 (13)	0.0049 (13)	0.048 (8.8)	0.53 (5)
80L(m)	0.16 (6.6)	2.2 (5)	0.0031 (15)	18 (5)	0.0056 (12)	0.0059 (12)	0.036 (9.7)	0.42 (5)
80L(b)	0.17 (6.5)	1.9 (5)	0.003 (15)	22 (5)	0.0062 (11)	0.0065 (12)	0.028 (10)	0.37 (5)
50L(s)	0.19 (6.3)	2.3 (5)	0.0019 (18)	12.1 (5)	0.004 (13)	0.0041 (13)	0.041 (9.3)	0.52 (5)
50L(m)	0.18 (6.4)	2 (5)	0.0023 (17)	15.4 (5)	0.0047 (13)	0.0057 (12)	0.039 (9.4)	0.47 (5)
50L(b)	0.17 (6.5)	2.3 (5)	0.0023 (17)	12 (5)	0.0051 (12)	0.0055 (12)	0.045 (8.9)	0.51 (5)
100(s)	0.131 (7.1)	3.3 (5)	0.0014 (20)	11.1 (5)	0.0049 (12)	0.0041 (13)	0.045 (9)	0.52 (5)
100(m)	0.14 (6.9)	2.5 (5)	0.0018 (18)	16.6 (5)	0.0053 (12)	0.0044 (13)	0.039 (9.4)	0.49 (5)
100(b)	0.17 (6.5)	2.2 (5)	0.002 (18)	13.4 (5)	0.0047 (13)	0.0057 (12)	0.042 (9.2)	0.51 (5)
100L(s)	0.21 (6.1)	3.4 (5)	0.0023 (17)	12.2 (5)	0.0062 (12)	0.0054 (12)	0.045 (9)	0.49 (5)
100L(m)	0.15 (6.8)	2.9 (5)	0.0019 (18)	12.7 (5)	0.0045 (13)	0.0041 (13)	0.043 (9.1)	0.51 (5)
100L(b)	0.2 (6.1)	3 (5)	0.0012 (21)	10.3 (5)	0.0041 (13)	0.0035 (14)	0.053 (8.5)	0.54 (5)
200(s)	0.123 (7.2)	4.1 (5)	0.0014 (20)	10.2 (5)	0.0051 (12)	0.0034 (14)	0.047 (8.8)	0.52 (5)
200(m)	0.17 (6.5)	3.3 (5)	0.0015 (19)	11.5 (5)	0.0071 (11)	0.0083 (11)	0.045 (9)	0.55 (5)
200(b)	0.14 (6.9)	3 (5)	0.0018 (18)	11 (5)	0.0043 (13)	0.0037 (14)	0.052 (8.6)	0.56 (5)
330R(s)	0.18 (6.3)	2.6 (5)	0.0023 (17)	12.3 (5)	0.0051 (12)	0.0049 (13)	0.043 (9.1)	0.51 (5)
330R(m)	0.17 (6.5)	2.8 (5)	0.0016 (19)	11.3 (5)	0.0034 (14)	0.0019 (17)	0.049 (8.7)	0.55 (5)
330R(b)	0.15 (6.8)	2.8 (5)	0.0014 (20)	11.1 (5)	0.004 (13)	0.0027 (15)	0.05 (8.6)	0.55 (5)
310(s)	0.16 (6.6)	3.4 (5)	0.0016 (19)	10.4 (5)	0.0053 (12)	0.0044 (13)	0.046 (8.9)	0.52 (5)
310(m)	0.128 (7.1)	2.9 (5)	0.002 (18)	10.8 (5)	0.0038 (14)	0.0018 (18)	0.049 (8.7)	0.55 (5)
310(b)	0.119 (7.3)	2.9 (5)	0.0019 (18)	11.1 (5)	0.0035 (14)	0.0019 (17)	0.042 (9.2)	0.54 (5)
550L(s)	0.15 (6.8)	3.3 (5)	0.0017 (18)	10.4 (5)	0.0072 (11)	0.0043 (13)	0.045 (9)	0.52 (5)
550L(m)	0.114 (7.4)	2.8 (5)	0.0012 (21)	10.8 (5)	0.0032 (14)	0.0028 (15)	0.048 (8.8)	0.56 (5)
550L(b)	0.15 (6.7)	2.7 (5)	0.0013 (20)	10.8 (5)	0.0028 (15)	0.0022 (16)	0.05 (8.7)	0.55 (5)

SR(s)	0.14 (6.9)	2.7 (5)	0.0011 (21)	10.7 (5)	0.003 (15)	0.0022 (16)	0.049 (8.7)	0.55 (5)
SR(m)	0.136 (7)	2.7 (5)	0.0018 (18)	10.6 (5)	0.0034 (14)	0.0038 (14)	0.048 (8.8)	0.54 (5)
SR(b)	0.124 (7.2)	2.7 (5)	0.0014 (20)	11.1 (5)	0.0027 (15)	0.0013 (19)	0.05 (8.7)	0.54 (5)
SRCW	0.15 (6.8)	2.7 (5)	0.0017 (18)	11.8 (5)	0.0047 (13)	0.0058 (12)	0.044 (9)	0.51 (5)
SR(h)	0.24 (5.8)	4.3 (5)	0.0072 (11)	38 (5)	0.081 (4.9)	0.156 (5)	0.018 (12)	0.126 (5)
3k	0.15 (3)	2.9 (1.8)	0.0014 (6.6)	10.5 (1.7)	0.0022 (6.6)	0.00107 (8.5)	0.048 (2.9)	0.55 (1.7)

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Станция	OM	LREE	MREE	HREE	REE
Riv(up)	190 (3.3)	0.016 (7.1)	0.018 (9.6)	0.0079 (9.5)	0.042 (5.2)
WW	460 (2.2)	0.04 (5.5)	0.064 (6.6)	0.017 (8.2)	0.12 (4.1)
Riv	190 (3.2)	0.023 (6.4)	0.02 (9.4)	0.0056 (11)	0.049 (5.1)
Riv(h)	220 (3.4)	0.094 (4.1)	0.058 (7)	0.012 (9)	0.16 (3.5)
100RCW	120 (3.2)	0.015 (7.5)	0.011 (12)	0.0025 (15)	0.029 (6.1)
RivCW	160 (3.2)	0.021 (6.8)	0.013 (11)	0.0035 (14)	0.037 (5.6)
40LCW	130 (3.2)	0.017 (7.2)	0.0077 (13)	0.002 (16)	0.026 (6)
100LCW	150 (3.2)	0.017 (7.2)	0.01 (11)	0.0031 (14)	0.03 (5.7)
100R(s)	110 (3.1)	0.0089 (8.8)	0.0096 (12)	0.0024 (14)	0.021 (6.9)
100R(m)	110 (3.2)	0.0095 (8.9)	0.0052 (15)	0.0014 (18)	0.016 (7.3)
100R(b)	110 (3.2)	0.015 (7.4)	0.01 (12)	0.0037 (12)	0.029 (5.8)
65(s)	110 (3.1)	0.01 (8.5)	0.014 (12)	0.0027 (15)	0.027 (7.1)
65(m)	120 (3.2)	0.0098 (8.7)	0.012 (12)	0.0016 (19)	0.023 (7.1)
65(b)	140 (3.2)	0.012 (7.9)	0.012 (11)	0.0042 (12)	0.028 (6)
80L(s)	110 (3.1)	0.0099 (8.5)	0.0085 (12)	0.0037 (11)	0.022 (6.2)
80L(m)	140 (3.2)	0.012 (8.1)	0.0096 (12)	0.0027 (15)	0.025 (6.4)
80L(b)	160 (3.2)	0.014 (7.6)	0.0093 (12)	0.0033 (14)	0.027 (6.1)
50L(s)	110 (3.2)	0.0088 (8.6)	0.0082 (12)	0.0026 (13)	0.02 (6.6)
50L(m)	130 (3.2)	0.011 (8.2)	0.009 (12)	0.0021 (16)	0.022 (6.5)
50L(b)	120 (3.2)	0.012 (7.9)	0.009 (12)	0.0031 (13)	0.024 (6.3)
100(s)	110 (3.1)	0.0098 (8.3)	0.02 (11)	0.0037 (14)	0.033 (7.1)
100(m)	120 (3.2)	0.011 (8)	0.013 (12)	0.0035 (13)	0.028 (6.7)
100(b)	120 (3.2)	0.011 (8.3)	0.012 (11)	0.0029 (13)	0.026 (6.4)
100L(s)	110 (3.1)	0.013 (8)	0.023 (10)	0.0046 (12)	0.04 (6.4)
100L(m)	120 (3.2)	0.0093 (8.7)	0.012 (12)	0.0015 (17)	0.023 (7.5)
100L(b)	110 (3.2)	0.0083 (8.9)	0.0057 (15)	0.0017 (17)	0.016 (7.4)
200(s)	110 (3.1)	0.0094 (8.5)	0.013 (12)	0.0022 (15)	0.025 (7.3)
200(m)	100 (3.1)	0.017 (7.3)	0.011 (12)	0.002 (17)	0.03 (6.3)
200(b)	100 (3.2)	0.009 (8.7)	0.0081 (13)	0.0019 (14)	0.019 (7.1)
330R(s)	110 (3.2)	0.011 (8.1)	0.01 (12)	0.0013 (18)	0.023 (6.9)
330R(m)	100 (3.2)	0.0057 (10)	0.0049 (15)	0.001 (20)	0.012 (8.4)
330R(b)	100 (3.2)	0.0075 (9.1)	0.0084 (12)	0.0032 (12)	0.019 (6.5)
310(s)	110 (3.1)	0.011 (8.3)	0.019 (11)	0.002 (17)	0.032 (7.5)
310(m)	100 (3.1)	0.0061 (10)	0.0084 (13)	0.0013 (16)	0.016 (8.3)
310(b)	100 (3.2)	0.0058 (10)	0.0075 (14)	0.0012 (18)	0.015 (8.5)
550L(s)	110 (3.1)	0.013 (7.9)	0.019 (12)	0.0021 (17)	0.033 (7.2)
550L(m)	100 (3.1)	0.0065 (9.6)	0.011 (13)	0.0015 (18)	0.019 (8.5)
550L(b)	100 (3.2)	0.0058 (9.9)	0.008 (13)	0.0024 (13)	0.016 (7.5)
SR(s)	100 (3.1)	0.0059 (10)	0.0062 (15)	0.001 (21)	0.013 (8.5)
SR(m)	100 (3.2)	0.0076 (9.5)	0.0044 (18)	0.00095 (20)	0.013 (8.3)
SR(b)	100 (3.1)	0.0046 (11)	0.0044 (17)	0.00054 (24)	0.0095 (9.4)
SRCW	100 (3.1)	0.011 (8.3)	0.0075 (13)	0.0016 (17)	0.02 (6.9)
SR(h)	160 (3.1)	0.25 (3.5)	0.11 (5.8)	0.02 (7.8)	0.38 (2.9)
3k	100 (1)	0.0041 (4.4)	0.0039 (6.3)	0.00082 (8.2)	0.0088 (3.5)

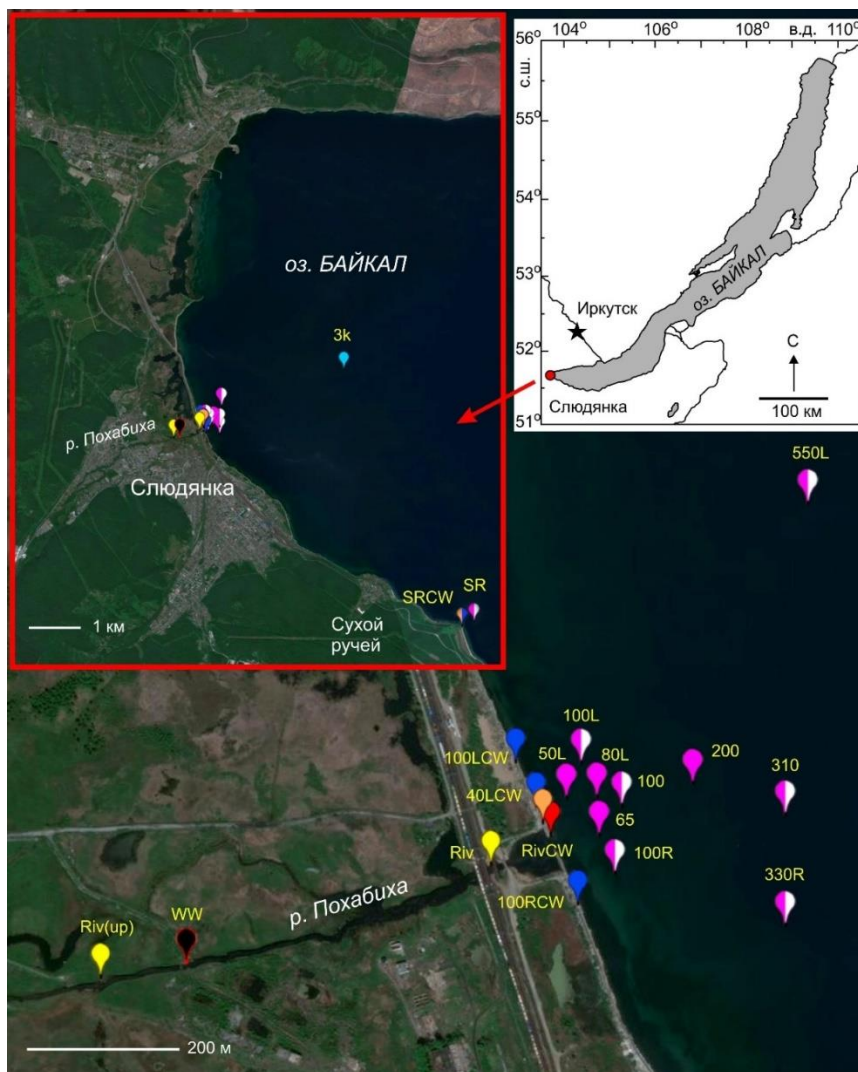


Рис. 1. Карта-схема оз. Байкал и космоснимки с указанием мест отбора проб в фоновых районах (врезка) и в зоне влияния сточных вод КОС г. Слюдянки и р. Похабихи.

Примечание. Космоснимки взяты из открытых источников (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). Желтыми символами отмечены места отбора речных проб (Riv(up) – 100 м выше трубы сброса КОС, Riv – устье), черным – сточных вод (WW – труба сброса КОС), красным – прибрежная вода напротив устья реки (RivCW), синими – прибрежная вода 40 м (40LCW) и 100 м (100LCW) от устья влево и 100 м от устья вправо (100RCW), розовыми – поверхностная, придонная и срединная вода в литорали, розовым с белым – станции на которых отбирались бентосные пробы; голубым – фоновая станция в 3 км от берега (3к). Цифры в названиях станций означают расстояния от устья (ст. RivCW), а индексы L и R – угловое направление (влево и вправо, соответственно) от линии, перпендикулярной берегу. Станции без индексов – напротив устья вблизи линии перпендикулярной берегу. Фоновые литоральные пробы были отобраны вблизи посёлка Сухой ручей в 6,5 км от устья р. Похабихи: интерстициальная вода на ст. SR(h), прибрежная на ст. SRCW, поверхностная, придонная и срединная на ст. SR на расстоянии 255 м от уреза.

Fig. 1. A schematic map of Lake Baikal and satellite images indicating sampling sites in the background areas (inset) and in the area of influence of wastewater of Slyudyanka City water treatment facilities (WTF) and Pokhabikha Rivier.

Note. Satellite images are taken from open sources (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). Yellow symbols mark the riverine sampling sites (Riv(up) – 100 m above the WTF discharge pipe, Riv – mouth), black – wastewater (WW – WTF discharge pipe), red – coastal water opposite the river mouth (RivCW), blue – coastal water 40 m (40LCW) and 100 m (100LCW) from the mouth to the left and 100 m from the mouth to the right (100RCW), pink – surface, bottom and middle water in the littoral, pink and white – stations where benthic samples were taken; blue is the background station in 3 km from the shore (3k). The numbers in the station names indicate the distance from the mouth (RivCW station), and the L and R indexes indicate the angular direction (left and right, respectively) from the

line perpendicular to the shore. Stations without indexes are located opposite the mouth near the line perpendicular to the shore. Background littoral samples were taken near the village of Sukhoi Ruchey, 6.5 km from the mouth of the river: interstitial water at SR(h) station, coastal water at SRCW station, surface, bottom and middle water at SR station at a distance of 255 m from the water edge.

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, Ахуген Scientific, Cat.-No. МСТ-200-С, 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 ± 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 ± 0.02 pH).

1.2. Многоэлементный ИСП-МС анализ

Подготовленные пробы воды измеряли на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500 се в ЦКП «Ультрамикроанализ» ЛИН СО РАН в соответствии с разработанными ранее подходами (Чебыкин и др., 2012; Чебыкин и др. 2020; Чебыкин и др. 2024а,б). 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 загроулением сигналов в 30 раз для изотопов ²³Na, ²⁷Al, ²⁸Si, ³⁹K и ¹¹⁵In (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 бутылированной воды (для Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, (Suturin et al., 2003)), 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. CGICII). 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⁺, MeAr⁺, MeCl⁺) проводили с использованием подхода, описанного в работе (Aries et al., 2000).

Ошибки измерения элементов, оценивали по экспериментально установленной зависимости к-нта вариации (*RSD* %) от величины аналитического сигнала (*N*, имп./с): *RSD* % =

$125.71 \cdot N^{-0.33103}$, 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 мг/дм³ – RSD >25 %; $0.001-0.1$ мг/дм³ – RSD 25-10 %; $0.1-1$ мг/дм³ – RSD 10-5 %; >1 мг/дм³ – RSD 5 %.

1.3. Расчёт общей минерализации воды

Расчёт 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 её 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/дм³) полагали, что он находится в виде ортокремневой кислоты (H_4SiO_4 , слабодиссоциируемой при pH < 9), при более высоких концентрациях – в её полимерных формах, условно, в виде линейного полимера $(\text{H}_2\text{SiO}_3)_n$ (Мышляева, Краснощеков, 1972). В расчёт 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. Расчёт ошибок результатов математических операций

Расчёт ошибок результатов математических операций в простых и сложных выражениях осуществлялся в соответствии с подходами, описанными в работе (Geyh, Schleicher, 1990).

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:

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

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. 1.

Согласно полученным данным, сточные воды КОС г. Слюдянки в исследуемый период превышают установленные нормативы (Приказ..., 2020) по Р (96 ПДК), Mn (5.6 ПДК), Fe (2.9 ПДК) и V (2.5 ПДК), и составляют более половины нормы по Cu (0.6 ПДК) и Mo (0.7 ПДК).

За исключением бария (Ba) концентрации всех информативных химических элементов в сточных водах больше, чем в речных на участке 100 м выше трубы сброса (табл. 1, рис. 2, столбец WW**). Наибольшее

различие (> 10 раз), характерно для Р (145 раз), Cl (81), Na (35), I (23), Fe (19), K (18), Zr (16), Ga (12), Cs (12), В (11) и Ni (11). Общая минерализация сточных вод г. Слюдянки составляла 460 мг/дм³, что в 2.4 раза выше, чем в р. Похабиха.

Речная вода в устье обогащена относительно речной воды на участке 100 м выше сброса сточных вод (рис. 2., столбец Riv**) Fe (4.6 раз), Sb (3.6), Mn (2), Р (2), Cl (1.9), Се (1.6), В (1.5), Zr (1.5), суммой лёгких редких земель LREE (1.4), Со (1.4), La (1.4), Na (1.2), общей суммой редких земель REE (1.2), Al (1.1), I (1.1) и Re (1.1), и обеднена суммой тяжёлых редких земель HREE (0.71). При сравнении тенденций изменения геохимических различий сточных и загрязнённых устьевых речных вод относительно условно чистых речных вод (WW** – Riv**, рис. 2) видно, что относительно высокие степени обогащения речной воды в устье по Fe, Zr, В, Mn, Sb, Со, и лёгким редкоземельным элементам связаны с влиянием дополнительных источников их поступления на участке ниже трубы сброса сточных вод. Такими источниками могут быть заболоченные протоки с низкими скоростями течения (см., рис. 1).

Относительно байкальских фоновых вод сточные воды обогащены большинством элементов, за исключением U, Мо и W (рис. 2, столбец WW*). Наибольшие степени обогащения (>100 раз) характерны для Mn (824), Р (308) и Ga (128). Высокие степени обогащения (10-100 раз) обнаружены по Cl (77), Fe (56), Cs (33), Zr (29), Si (27), HREE (21), Се (21), Ge (17), Rb (17), MREE (16), REE (16), Со (13), Y (13), Na (13), K (13) и Ti (10).

Загрязнённые устьевые речные воды в наибольшей степени обогащены относительно байкальских фоновых вод Mn (182 раза), в меньшей степени Si (17), Fe (14), Ga

(12), и редкоземельными элементами (5-10 раз), рис. 2, столбец Riv*.

Степень влияния каждого водного источника (речные, сточные и фоновые байкальские воды) на литоральные воды Байкала в зоне действия р. Похабихи зависит от их водных вкладов и геохимических составов.

2.1. Водный вклад сточных вод в речные воды

Для расчёта водных вкладов сточных вод КОС г. Слюдянки в общий речной сток р. Похабихи мы использовали подход, описанный в работах (Чебыкин и др., 2024б; Чебыкин и др., 2025 (в печати)), с учётом множества потенциально пригодных (допустимых) химических элементов, разбитых на несколько групп (рис. 3).

$$C_{i_calc} = Part_ww_riv \times C_{i_ww} + Part_riv(up)_riv \times C_{i_riv(up)} \quad (5),$$

$$Part_ww_riv + Part_riv(up)_riv = 1 \quad (6),$$

$$Part_ww_riv \geq 0; Part_riv(up)_riv \geq 0 \quad (7),$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_{i_calc} - C_i}{C_i} \right) \times 100 \right]^2} \rightarrow 0 \quad (8),$$

где C_{i_calc} и C_i – расчетная и измеренная концентрации элемента i в р. Похабиха в устье, соответственно; C_{i_ww} , $C_{i_riv_up}$ – измеренные концентрации элемента i в сточной воде КОС г. Слюдянка и в р. Похабихе выше сброса сточных вод, соответственно, а $Part_ww_riv$, $Part_riv(up)_riv$ – водные вклады соответствующих источников смешения; Δ – среднеквадратичное расхождение расчетных и измеренных концентраций элементов в р. Похабихе в устье (в объекте смешения), в %.

Элемент	WW**	Riv**	WW*	Riv*
P	145	2.0	308	4.2
Cl	81	1.9	77	1.8
Na	35	1.2	13	0.45
I	23	1.1	6.5	0.32
Fe	19	4.6	56	14
K	18	1.1	13	0.78
Zr	16	1.5	29	2.7
Ga	12	1.1	128	12
Cs	12	0.87	33	2.5
B	11	1.5	7.9	1.09
Ni	11	1.00	7.0	0.64
Rb	9.4	1.10	17	2.0
Mn	9.0	2.0	824	182
As	8.1	0.95	1.3	0.15
Sb	7.3	3.6	2.6	1.3
Br	6.8	1.10	2.8	0.44
Co	6.2	1.4	13	3.0
Li	5.4	1.09	2.2	0.45
Ge	5.1	1.00	17	3.3
V	4.5	1.04	6.4	1.5
Ti	3.9	1.2	10	3.0
MREE	3.5	1.1	16	5.3
Ce	3.2	1.6	21	10
S	2.9	0.94	4.8	1.6
REE	2.9	1.2	14	5.6
Al	2.7	1.1	6.6	2.8
Y	2.6	1.00	13	5.2
LREE	2.5	1.4	9.8	5.7
OM	2.4	1.00	4.6	1.9
Mo	2.4	0.97	0.51	0.21
HREE	2.2	0.71	21	6.9
La	2.1	1.4	6.8	4.5
Cu	2.0	1.03	2.7	1.3
Mg	1.8	1.04	3.8	2.2
Cr	1.7	1.00	4.9	2.8
Ca	1.6	1.00	3.1	1.9
U	1.6	1.00	0.76	0.47
W	1.6	0.93	0.46	0.27
Si	1.6	0.98	27	17
Sr	1.3	1.02	1.4	1.1
Ba	0.89	1.04	2.4	2.8

Ранг различий	Ранг различий
(14) >100 раз	(0) <0.01 раз
(13) 30-100 раз	(1) 0.01-0.033 раз
(12) 10-30 раз	(2) 0.033-0.1 раз
(11) 5-10 раз	(3) 0.1-0.2 раз
(10) 3-5 раз	(4) 0.2-0.33 раз
(9) 2-3 раза	(5) 0.33-0.5 раз
(8) 1.1-2 раз	(6) 0.5-0.91 раз
(7) 0.91-1.1 раз (7*) 0.91-1.1 раз – нет достоверных отличий	(7*) <=0.91 или >=1.1 раз - нет достоверных отличий (перекрывание доверительных интервалов)

Рис. 2. Тепловая карта геохимических различий (в размах) сточных и речных вод

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

Fig. 2. Heat map of geochemical differences (in times) of wastewater and riverine waters.

Note. * – relative to the photic layer in 3 km from the water edge, ** – relative to the Pokhabikha River

above the wastewater discharge, OM is the total mineralization.

Решение системы уравнений (5)-(8) является задачей на оптимизацию переменных (водных вкладов $Part_{ww_riv}$, $Part_{riv(up)_riv}$) при поиске глобального минимума по параметру $\Delta\%$ и осуществлялось численными методами с помощью модуля «Поиск решения» в ПО Excel.

Принципы отбора потенциально пригодных элементов для расчета водных вкладов подробно описаны в предыдущих работах (Чебыкин и др., 2024а,б; Чебыкин и др., 2025 (в печати)). Необходимо, чтобы концентрации элементов в источниках смешения различались, чем больше – тем лучше (фактор контрастности); элементы должны вести себя консервативно – смешиваться чисто механически, без изменения концентрации на физико-химических и биогеохимических барьерах; элементы должны удовлетворять граничным условиям – их концентрации в объектах смешения не должны быть больше максимальных или меньше минимальных в источниках смешения; элементы должны надёжно определяться методом ИСП-МС в исследуемых объектах. Для системы смешения «р. Похабиха – сточные воды КОС г. Слюдянка» отобрано восемь потенциально пригодных элементов – Cl, Na, I, K, Rb, Br, Li и V, которые были разделены на пять групп: Группа {1} – высококонтрастные (Вкт) и типично консервативные (Тк) элементы: Na и Cl; Группа {2} – все допустимые Вкт элементы:– Na, Cl, I и K; Группа {3} – Вкт, надёжно определяемые (НО) и условно надёжно определяемые (УНО) элементы: Na, Cl и K; Группа {4} – все допустимые Вкт и контрастные (Кт) элементы:– Na, Cl, I, K, Rb, Br, Li и V; Группа {5} – Вкт, Кт, НО и УНО элементы: Na, Cl, K, Rb, Li и V. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Элемент	FC	Контрастность	Консервативность	Надежность определения	НизК; ОНизК в объектах смешения	ОНизК в источниках	Группа {1} ВКт&ТК	Группа {2} ВКт	Группа {3} ВКт&НО	Группа {4} ВКт&Кт	Группа {5} ВКт&Кт&НО
P	145	СВКт	НК(б)	УНО							
Cl	81	ВКт	ТК	УНО			1	1	1	1	1
Na	35	ВКт	ТК	НО			1	1	1	1	1
I	23	ВКт	К	ННО				1		1	
Fe	19	ВКт	НК (о/в)	ННО							
K	18	ВКт	УК(чб)	НО				1	1	1	1
Zr	16	ВКт	УК(взв)	УНО	ОНизК	Riv(up)					
Ga	12	ВКт	УК	УНО	ОНизК	Riv(up)					
Cs	12	ВКт	К	УНО	ОНизК	Riv(up)					
B	11	ВКт	УК(чб)	НО							
Ni	11	ВКт	УК(взв)	ННО							
Rb	9.4	Кт	К	НО						1	1
Mn	9.0	Кт	НК (о/в)	НО							
As	8.1	Кт	УК(д)	УНО	НизК						
Sb	7.3	Кт	УК	УНО	НизК						
Br	6.8	Кт	К	УНО						1	
Co	6.2	Кт	К	УНО	НизК						
Li	5.4	Кт	К	НО						1	1
Ge	5.1	Кт	УК	ННО	ОНизК	Riv(up)					
V	4.5	СКт	УК(д)	НО						1	1
Ti	3.9	СКт	УК(взв)	ННО							
MREE	3.5	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК						
Ce	3.2	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК	Riv(up)					
S	2.9	СКт	К	ННО							
REE	2.9	СКт	УК(орг, взв)	УНО							
Al	2.7	СКт	УК(взв)	НО							
Y	2.6	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК						
LREE	2.5	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК						
OM	2.4	СКт	К	УНО							
Mo	2.4	СКт	К	НО							
HREE	2.2	СКт	УК(орг, взв)	УНО	ОНизК	Riv(up)					
La	2.1	СКт	УК(орг, взв)	УНО	НизК	Riv(up)					
Cu	2.0	СКт	УК	УНО*							
Mg	1.8	НКт	К	НО							
Cr	1.7	НКт	УК(взв)	ННО							
Ca	1.6	НКт	К	НО							
U	1.6	НКт	УК	НО							
W	1.6	НКт	К	УНО	НизК						
Si	1.6	НКт	УК(чб)	НО							
Sr	1.3	ОНКт	К	НО							
Ba	1.1*	ОНКт	К	НО							

Рис. 3. Классификация элементов по категориям контрастности, консервативности и надежности определения, выбор элементов и их групп для расчета водных вкладов сточных вод КОС г. Слюдянки (*Part_ww_riv*) в формирование вод р. Похабихи (элементы, исключенные из расчетов выделены красным шрифтом, “1” в группах – включенный в расчет элемент).

Примечание. $FC = WW / Riv(up)$ – фактор контрастности, отношение концентраций элементов в источниках смешения: *WW* – сточные воды, *Riv(up)* – р. Похабиха выше сброса сточных вод, [для отношений $WW / Riv(up) < 1$ взяты обратные величины, отмечены звездочкой (*)].

Контрастность: 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 ($FC < 1.4$).

Консервативность: ТК – типично консервативный, К – консервативный, УК – условно консервативный [(орг) – мигрирующий в составе тонкодисперсных органо–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 [значимые корректировки 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. 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 аналита].

Fig. 3. Classification of elements by categories of contrast, conservativeness and measurement reliability, selection of elements and their groups for calculating the water contributions of wastewater of Slyudyanka City WTF (*Part_ww_riv*) to the formation of the riverine waters (the elements excluded from the calculations are highlighted in red, the “1” in the groups is the element included in the calculation).

Note. $FC = WW/Riv(up)$ – contrast factor, ratio of elements concentrations in mixing sources: *WW* – wastewater, *Riv(up)* – Pokhabikha River above the wastewater discharge, [for ratios $WW/Riv(up) < 1$, reversal values are taken].

Contrast: **СВКт** – ultrahigh contrast ($FC > 100$), **ВКт** – high contrast ($FC = 10-100$), **Кт** – contrast ($FC = 5-10$), **СКт** – medium contrast ($FC = 2-5$), **Нкт** – low contrast ($FC = 1.4-2$), **ОНкт** – very low contrast ($FC < 1.4$).

Conservativeness: **Тк** – typically conservative, **К** – conservative, **Ук** – 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], **Нк** – non-conservative [(**о/в**) – Red/Ox dependent, (**б**) – biogenic].

Determination reliability: **НО** – determined reliably in all objects, **УНО** – conventionally reliably determinable [valuable corrections to interference and/or subtraction of instrumental background or low concentrations ($< 0.1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) (**НизК**) or very low ($< 0.01 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, for $S_b < 0.05 \mu\text{g}/\text{dm}^3$) (**ОНизК**) in all objects or in their major part (**НизК***, **ОНизК***) or **ОНизК** in mixing sources]. **УНО*** – conventionally reliably determinable [episodic contamination of samples or of the mass-spectrometer], **ННО** – 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].

Т а б л и ц а 2

Результаты расчёта водного вклада сточных вод КОС г. Слюдянки (*Part_ww_riv*) и чистых речных вод (*Part_riv(up)_riv*) в р. Похабику

Table 2

The results of calculating the water contribution of wastewater of Slyudyanka City WTF (*Part_ww_riv*) and clean riverine waters (*Part_riv(up)_riv*) into the Pokhabikha River

Результаты расчёта	Группа {1} ВКт&Тк	Группа {2} ВКт	Группа {3} ВКт&НО	Группа {4} ВКт&Кт	Группа {5} ВКт&Кт&НО	Среднее
<i>Part_ww_riv</i>, %	1.01	0.95	0.99	0.96	1.00	0.98
Δ , %	7.7	6.8	6.7	5.3	5.1	2.9*
<i>Part_riv(up)_riv</i>, %	98.99	99.05	99.01	99.04	99.00	99.02
Error, %	0.08	0.06	0.07	0.05	0.05	0.03*
Тест с генератором случайных чисел (n=50)						
<i>Part_ww_riv</i> (test) max, %	1.15	1.09	1.10	1.11	1.13	
<i>Part_ww_riv</i> (test) min, %	0.88	0.81	0.87	0.81	0.87	
<i>Part_ww_riv</i> (test) aver, %	1.01	0.94	0.98	0.95	1.01	0.98
RSD (test), %	6.7	7.0	5.9	6.0	7.2	3.0*
Error (test), %**	1.9	2.0	1.7	1.7	2.0	

Примечание. Формирование групп элементов описано в тексте и показано на рис.3; $\Delta\%$ – среднеквадратичное отклонение расчетных и измеренных концентраций элементов в объекте смешения, показывает ошибку расчета *Part_ww_riv*; * – расчёт ошибок для результата усреднения проведён по формуле (2); ** – ошибка расчёта среднего результата с использованием статистики Стьюдента.

Note. The formation of groups of elements is described in the text and shown in Fig.3; $\Delta\%$ is the standard deviation of the calculated and measured concentrations of elements in the mixing object, it shows the calculation error of *Part_ww_riv*; * – error calculation for the averaging result is carried out according to formula (2); ** – error calculation of the average result using Student statistics.

Из анализа табл. 2 следует, что расчёт водного вклада сточных вод в р. Похабику по пяти группам даёт близкие результаты и составляет в среднем 0.98 % с относительной ошибкой 2.9 %. Для проверки устойчивости

решения был проведён тест, в котором концентрации элементов варьировались случайным образом (отдельно для каждого элемента на каждой станции) в пределах их ошибок определения (относительные ошибки

определения элементов представлены в табл. 1). В каждой группе было проведено 50 вычислений, определены максимальные, минимальные и средние величины, а также коэффициенты вариации и ошибки среднего результата (см. табл. 2). Из полученных данных следует, что исходные и усреднённые тестовые величины водных вкладов в группах практически совпадают, а ошибки их определения (Δ , % и RSD (test), %) весьма близки, что указывает на то, что параметр Δ является адекватной оценкой точности определения водных вкладов.

Водный вклад чистых речных вод в р. Похабиху ($Part_{riv}(up)_{riv}$) в отсутствие значимых вкладов других источников определяется как:

$$Part_{riv}(up)_{riv} = 1 - Part_{ww}_{riv} \quad (9),$$

и может быть пересчитан из полученных величин $Part_{ww}_{riv}$. Согласно расчётам, их вклад составляет в среднем 99.02 % с относительной погрешностью 0.03 % (см. табл. 2).

2.2. Водные вклады загрязнённых речных вод и сточных вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабиха

Для расчёта водного вклада загрязнённых речных вод в литорали Байкала в зоне их влияния мы использовали тот же самый подход, что и для расчёта водного вклада сточных в речные, но, естественно, с другим набором допустимых элементов (рис. 4).

Элемент	FC	Контрастность	Консервативность	Надёжность определения	НизК; ОНизК во всех или в большинстве (*) объектах смешения	ОНизК в источниках	{1} Кт	{2} СКт	{3} Нкт	{4} Кт&СКт	{5} Кт&СКт&НО	{6} Все	{7} Все&НО
Mn	182	СВКт	НК (о/в)	НО									
Si	17	ВКт	УК(чб)	НО									
Fe	14	ВКт	НК (о/в)	ННО									
Ga	12	ВКт	УК	УНО	ОНизК	Riv							
Ce	10	Кт	УК(орг, взв)	УНО	ОНизК*	BW							
HREE	6.9	Кт	УК(орг, взв)	УНО	ОНизК	Riv							
As	6.5*	Кт	УК(л)	УНО			1			1		1	
LREE	5.7	Кт	УК(орг, взв)	УНО	НизК*	BW							
REE	5.6	Кт	УК(орг, взв)	УНО	НизК	BW							
MREE	5.3	Кт	УК(орг, взв)	УНО	НизК*	BW							
Y	5.2	Кт	УК(орг, взв)	УНО	НизК*	BW							
Mo	4.9*	СКт	К	НО			1			1	1	1	1
La	4.5	СКт	УК(орг, взв)	УНО	ОНизК	Riv							
P	4.2	СКт	НК(о)	УНО									
W	3.7*	СКт	К	УНО	НизК			1		1		1	
Ge	3.3	СКт	УК	ННО	ОНизК	Riv							
I	3.1*	СКт	К	ННО									
Ti	3.0	СКт	УК(взв)	ННО									
Co	3.0	СКт	К	УНО	НизК								
Cr	2.8	СКт	УК(взв)	ННО									
Al	2.8	СКт	УК(взв)	НО									
Ba	2.8	СКт	К	НО				1		1	1	1	1
Zr	2.7	СКт	УК(взв)	УНО	ОНизК	Riv							
Cs	2.5	СКт	К	УНО	ОНизК	Riv							
Br	2.3*	СКт	К	УНО									
Li	2.2*	СКт	К	НО				1		1	1	1	1
Na	2.2*	СКт	БК	НО				1		1	1	1	1
Mg	2.2	СКт	К	НО				1		1	1	1	1
U	2.1*	СКт	УК	НО				1		1	1	1	1
Rb	2.0	СКт	К	НО				1		1	1	1	1
OM	1.9	НКт	К	УНО					1			1	1
Ca	1.9	НКт	К	НО					1			1	1
Cl	1.8	НКт	БК	УНО					1			1	
Ni	1.6*	НКт	УК(взв)	ННО									
S	1.6	НКт	К	ННО									
V	1.5	НКт	УК(л)	НО					1			1	1
Cu	1.3	ОНКт	УК	УНО*									
Sb	1.3	ОНКт	УК	УНО									
K	1.3*	ОНКт	УК(чб)	НО									
Sr	1.1	ОНКт	К	НО									
B	1.1	ОНКт	УК(чб)	НО									

Рис. 4. Классификация элементов по категориям контрастности, консервативности и надёжности определения, выбор элементов и их групп для расчета водных вкладов загрязнённых речных вод ($Part_{riv}(up)_{riv}$) в формирование литоральных вод Байкала в зоне влияния р. Похабиха (элементы, исключённые из расчетов выделены красным шрифтом, "1" в группах – включенный в расчет элемент).

Примечание. $FC = Riv / BW$ – фактор контрастности, отношение концентраций элементов в источниках смешения: Riv – р. Похабиха, устье, BW – байкальская вода на фоновой станции (3к) [для отношений $Riv / BW < 1$ взяты обратные величины, отмечены звёздочкой (*)]. Остальные обозначения даны в примечании к рис 3.

Fig. 4. Classification of elements by categories of contrast, conservativeness and measurement reliability, selection of elements and of their groups for calculating the water contributions of polluted riverine waters ($Part_{riv}(up)_{riv}$) to the formation of the littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the

Pokhabikha River (the elements excluded from the calculations are highlighted in red, the “1” in the groups is the element included in the calculation).

Note. $FC = Riv / BW$ – contrast factor, ratio of elements concentrations in mixing sources: *Riv* – Pokhabikha River, mouth, *BW* – Baikalian water at the background station (3k), *WW* – wastewater, *Riv(up)* – Pokhabikha River above the wastewater discharge, [for ratios $Riv / BW < 1$, reversal values are taken]. The other designations are given in the note to Fig. 3.

В связи с более низкой контрастностью в системе смешения «р. Похабиха (устье) – байкальская вода» список потенциально пригодных элементов был расширен на категорию среднеконтрастных (СКт) и низкоконтрастных (НКт). Для тестирования на устойчивость результатов расчёта было отобрано 13 элементов (As, Mo, W, Ba, Li, Na, Mg, U, Rb, OM, Ca, Cl и V), которые были разделены не семь групп: {1} – контрастные (Кт): As, Mo; {2} – СКт: W, Ba, Br, Li, Na, Mg, U и Rb; {3} – НКт: OM, Ca, Cl и V; {4} – Кт&СКт, объединяющая группы {1} и {2}; {5} – Кт&СКт&НО, в которой оставлены только надёжно определяемые (НО) элементы группы {4} (исключены As и W); {6} – Все, включающая все 13 тестируемых элементов, {7} – Все&НО, в которой оставлены только надёжно определяемые элементы группы {6} (исключены As, W, OM и Cl). Результаты

расчетов представлены в табл. 3. Характеристики геохимического состава исследованных проб позволяют надёжно рассчитать вклады загрязнённых речных вод для станций в радиусе 100 метров от устья р. Похабихи, а также в поверхностной воде на ст. 200 (в 200 метрах напротив устья). В более удалённых от устья секторах, из-за сильного разбавления речных вод байкальскими в отсутствии высококонтрастных индикаторов, точность определения элементов не позволяет получить однозначных оценок. В прибрежной воде на ст. 40LCW и ст. 100LCW в 40 и 100 м влево от устья также невозможно однозначно определить водные вклады загрязнённых речных вод из-за контаминации, вероятно, вследствие влияния других локальных источников (площадной смыв, интерстициальные воды?).

Таблица 3

Водный вклад загрязнённых речных (*Part_riv_lit*) и сточных (*Part_ww_lit*) вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабиха

Table 3

Water contribution of polluted riverine waters (*Part_riv_lit*) and wastewater (*Part_ww_lit*) into the littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the Pokhabikha River

Станция	Параметр	{1} N = 2	{2} N = 7	{3} N = 4	{4} N = 9	{5} N = 7	{6} N = 13	{7} N = 9	Среднее *	Part_ww_lit, % [Error, %]**
100 RCW	Part_riv_lit, %	16	15	20	15	16	16	17	16	0.156
	Δ, % (Error, %)	0.27	5.8	4.6	5.2	4.1	5.3	4.5	(1.9)	[3.4]
Riv CW	Part_riv_lit, %	65	61	68	63	63	64	63	63	0.621
	Δ, % (Error, %)	3.2	3.4	3.0	4.2	2.7	4.0	3.4	(1.4)	[3.2]
100R (s)	Part_riv_lit, % Искл.	13	9.8	9.1 Cl, V	10	8.5	10 Cl, V	8.4 V	9.5	0.093
	Δ, % (Error, %)	2.7	4.2	1.6	4.1	2.2	3.8	2.1	(1.6)	[3.3]
100R (m)	Part_riv_lit, %	6.1	8.2	10	7.7	7.8	8.2	8.2	7.7	0.076
	Δ, % (Error, %)	0.23	1.0	1.8	1.1	1.2	1.6	1.6	(0.5)	[2.9]
100R (b)	Part_riv_lit, % Искл.	5.5	6.5 W, Li	17 Cl	6.2 W, Li	6.6 Li	8.1 W, Li, Cl	8.3 Li	6.9	0.068
	Δ, % (Error, %)	1.9	2.3	11	2.2	2.1	7.4	8.1	(2.3)	[3.7]
65 (s)	Part_riv_lit, % Искл.	8.6	5.8	7.6 Cl	6.4	5.5	6.6 Cl	5.4	6.4	0.063
	Δ, % (Error, %)	0.75	4.2	2.2	3.8	3.8	3.5	3.4	(1.3)	[3.2]
65	Part_riv_lit, %	20	15	18	16	15	16	15	16	0.153

(m)	Искл.			Cl			Cl			
	Δ , %	5.0	2.5	2.3	3.9	1.8	3.6	1.6	(1.3)	[3.2]
65	Part_riv_lit, %	44	37	51	40	38	41	40	39	0.386
(b)	Δ , % (Error, %)	7.7	4.6	12	6.4	2.5	9.1	9.1	(3.1)	[4.2]
80L	Part_riv_lit, %	9.0	4.7	8.8	5.5	5.5	6.1	5.7	5.5	0.054
(s)	Искл.			Cl			Cl			
	Δ , % (Error, %)	0.3	3.5	1.6	3.5	3.4	3.3	3.1	(1.5)	[3.2]
80L	Part_riv_lit, %	45	41	53	43	43	44	44	43	0.425
(m)	Δ , % (Error, %)	1.3	3.1	9.2	3.3	1.6	6.5	6.7	(1.8)	[3.4]
80L	Part_riv_lit, %	63	62	81	62	63	64	64	63	0.617
(b)	Δ , % (Error, %)	2.1	3.1	14	2.9	2.1	9.5	9.9	(2.5)	[3.8]
50L	Part_riv_lit, %	15	12	11	13	12	13	12	12	0.122
(s)	Искл.			Cl			Cl			
	Δ , % (Error, %)	0.17	4.0	1.2	3.7	3.1	3.3	2.9	(1.5)	[3.3]
50L	Part_riv_lit, %	32	30	36	31	31	32	32	31	0.305
(m)	Δ , % (Error, %)	2.1	3.1	2.5	3.0	2.7	3.4	3.6	(1.2)	[3.1]
50L(b)	Part_riv_lit, %	14	13	15	13	13	13	14	13	0.131
	Δ , % (Error, %)	1.2	4.2	6.1	3.8	4.1	4.7	4.1	(1.6)	[3.3]
100	Part_riv_lit, %	13	7.5	7.9	8.7	7.7	8.5	7.4	8.0	0.078
(s)	Искл.			Cl			Cl			
	Δ , % (Error, %)	2.7	4.9	2.0	5.0	4.9	4.4	4.4	(2.1)	[3.6]
100	Part_riv_lit, %	27	28	24	27	28	27	28	27	0.269
(m)	Δ , % (Error, %)	0.23	3.2	2.9	2.8	3.1	3.1	3.1	(1.1)	[3.1]
100	Part_riv_lit, %	19	17	16	18	17	17	18	18	0.173
(b)	Δ , % (Error, %)	2.2	1.5	8.4	2.0	1.5	5.0	4.1	(1.2)	[3.1]
100L	Part_riv_lit, %	18	12	14	14	14	14	14	13	0.132
(s)	Δ , % (Error, %)	0.29	3.7	1.9	4.0	3.9	3.5	3.6	(1.7)	[3.3]
100L	Part_riv_lit, %	9.9	13	17	12	12	13	13	12	0.119
(m)	Δ , % (Error, %)	0.48	2.0	4.2	2.0	2.0	3.3	2.8	(1.0)	[3.0]
100L	Part_riv_lit, %	0.34	3.3	10	2.7	3.3	5.1	5.0	3.9	0.038
(b)	Искл.	Mo	W, Ba, Li	Cl	Mo, W, Ba, Li	Mo, Ba, Li	Mo, W, Ba, Li, Cl	Mo, Ba, Li		
	Δ , % (Error, %)	0.0	0.6	4.4	1.2	0.6	4.0	3.9	(1.5)	[3.2]
200	Part_riv_lit, %	9.5	7.9	5.5	8.5	8.3	7.5	7.4	8.2	0.081
(s)	Искл.		Ba, Rb		Ba, Rb	Ba, Rb	Ba, Rb	Ba, Rb		
	Δ , % (Error, %)	2.9	2.8	3.0	2.9	2.5	3.1	2.4	(1.1)	[3.1]

Примечание. Формирование групп элементов описано в тексте и показано на рис. 4; 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); 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; * – расчёт ошибок для результата усреднения проведён по формуле (2), из расчёта исключены группы, выделенные серой заливкой. ** - расчёт водных вкладов сточных вод в литорали озера проведен по формуле (10), а ошибок определения по формуле (4).

Note. The formation of groups of elements is described in the text and shown in Fig. 4; N is the number of elements in the group; Δ , % is the standard deviation of the calculated and measured concentrations of elements in the mixing object, shows the quality of the calculation *Part_riv_lit*, (the smaller the better); Искл. – the element is excluded from the calculation because it does not meet the boundary conditions: its concentration is significantly higher (highlighted in bold) or lower (highlighted in non-bold) than in the sources of mixing; * – the calculation of errors for the averaging result is carried out according to formula (2), the groups highlighted in gray are excluded from the calculation. ** - calculation of water contributions of wastewater in the lake littoral was carried out according to formula (10), and errors of determination according to formulas (4).

Таблица 3 демонстрирует хорошую устойчивость расчётов водных вкладов, полученных во всех группах, за исключением группы {3}, которая в большинстве случаев даёт результаты, заметно отличающиеся от других групп. Результаты этой спорной группы,

состоящей только из низкоконтрастных элементов, мы исключили из последующего рассмотрения. Довольно часто результаты, полученные в группе двух контрастных элементов {1} (As, Mo), из которых As определяется условно надёжно, также имеют выбросы (в

основном, в сторону увеличения водных вкладов). Эту группу элементов в некоторых случаях мы также исключили из

рассмотрения (выделено серой заливкой в табл. 3). Полученные результаты более наглядно представлены на рис. 5.

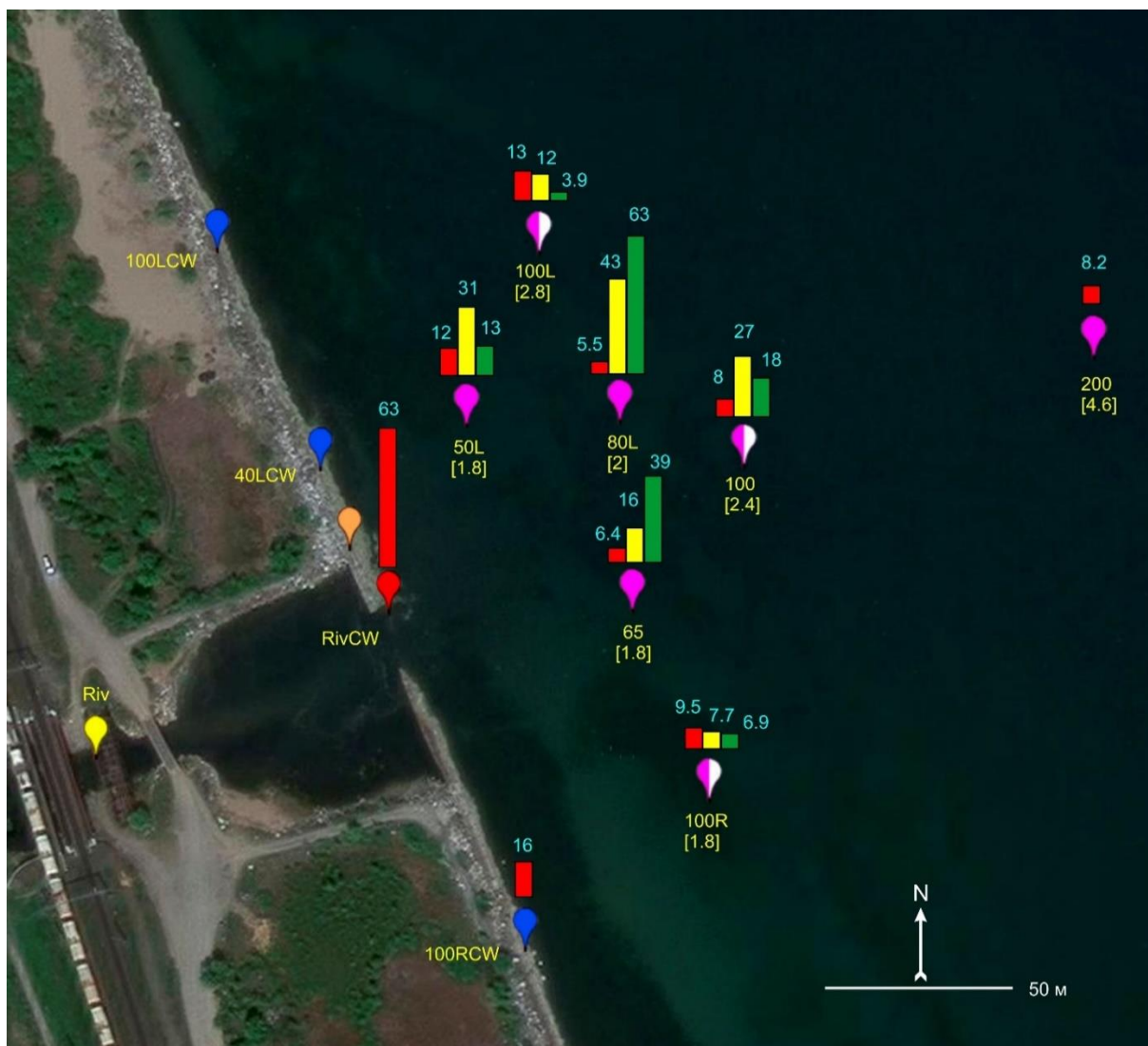


Рис. 5. Распределение водных вкладов загрязнённых речных вод в литорали Байкала в зоне влияния р. Похабики.

Примечание Космоснимок взят из открытых источников (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). Красными барами показаны водные вклады речных вод (значения в % подписаны голубым шрифтом) в поверхностные воды литорали, жёлтыми – в срединные, зелёными – в придонные. В квадратных скобках указаны глубины. Остальные обозначения такие же, как на рис. 1.

Fig. 5. Distribution of water contributions of polluted riverine waters in Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Pokhabikha River.

Note The satellite image is taken from open sources (SAS Planet, <https://sasplanet.ru/>). The red bars show the water contributions of riverine waters (values in % are signed in blue) to the surface waters of the littoral, yellow – to the middle waters, green – to the bottom waters. The depths are shown in square brackets. The other symbols are the same as in Fig. 1.

Из полученных данных (табл. 3, рис. 5) следует, что максимальный вклад загрязнённых речных вод 63 % наблюдается в

прибрежной воде напротив устья (ст. RivCW), что ожидаемо. Однако такой же большой вклад речных вод обнаружен в

придонной воде (глубина 2 м) на ст. 80L (в 80 м под углом влево от устья) с последующим уменьшением вверх по глубинному профилю – 43 % на глубине 1 м и 5.5 % в поверхностной воде. Такой же инверсный профиль распределения речных вод, но с меньшими вкладами на глубинах, наблюдается на соседней станции ст. 65 (в 65 метрах напротив устья) – 39 % в придонной воде (глубина 1.8 м), 16 % в срединной воде (глубина 0.9 м) и 6.4 % в поверхностной воде. На двух других ближайших соседних станциях ст. 50L (в 50 м под углом влево от устья, глубина 1.8 м) и ст. 100 (в 100 м напротив устья, глубина 2.4 м) водный вклад речных вод в срединных водах (m) больше чем в придонных (b) и поверхностных (s): ст. 50L – 12 % (s) / 31 % (m) / 13 % (b); ст. 100L – 8 % (s) / 27 % (m) / 18 % (b). На краевых станциях сектора 100 м от устья – ст. 100L (в 100 м под углом влево, глубина 2.8 м) и 100R (в 100 м под углом вправо, глубина 1.8 м) профиль распределения вкладов речных вод прямой и почти однородный: ст. 100L – 13 % (s) / 12 % (m) / 3.9 % (b); ст. 100R – 9.5 % (s) / 7.7 % (m) / 6.9 % (b). В поверхностной воде ст. 200 (в 200 м напротив устья) вклад речных вод – 8.2 %, в прибрежной воде ст. 100RCW (в 100 м вправо от устья) – 16 %.

Такая сложная картина распределения вод р. Похабихи в литорали указывает на вероятную субаквальную разгрузку речного стока в зоне ст. 80L и ст. 65 с последующим внедрением потоков в срединную толщу на соседних станциях ст. 50L и ст. 100. Можно также предполагать, что происходит затопление более холодных (8.6 °C) и минерализованных (190 мг/дм³) поверхностных речных вод в

более тёплых (11–12 °C) и пресных (~ 100 мг/дм³) литоральных водах, однако вероятность и степень воздействия таких процессов требует проведения гидрологических расчётов. По факту, мы наблюдаем сложную картину смешения речных и байкальских вод в литорали в зоне влияния р. Похабихи с двумя основными выходами речных вод – поверхностным и субаквальным. Наличие искусственного пруда в приустьевой зоне (рис. 1) вполне может способствовать просачиванию речных вод в проницаемые песчаные грунты с последующей субаквальной разгрузкой.

Таким образом, на момент исследования, граница водных вкладов загрязнённых вод р. Похабихи в литорали Байкала прослеживается на всех глубинах в радиусе ~ 100 м от устья, а фронтально по поверхности достигает 200 м; в прибрежной зоне, вероятно, распространяется далее 100 м.

Водные вклады сточных вод в литорали (*Part_ww_lit*) рассчитываются на основе полученных вкладов загрязнённых речных вод в литорали и вкладов сточных вод в р. Похабихи, полученных на предыдущем этапе вычислений (*Part_ww_riv* = 0.0098, табл. 2) согласно (10):

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

Средние величины водных вкладов сточных вод в литорали, рассчитанные по (10), представлены в табл. 3 и на рис. 6. Очевидно, что они в 100 раз меньше, чем водные вклады загрязнённых речных вод в литорали.

Fig. 6. Heat map of geochemical contributions (ГХВ, in%) of Slyudyanka City wastewater into the Pokhabikha River and into the littoral waters of Lake Baikal in the zone of its influence in comparison with the water contributions of wastewater (*Part_ww*) and polluted riverine waters (*Part_riv*).

Note. СГХВ – summary geochemical contributions for all elements (rare earth elements are accounted for by the total amount of REE), СГХВ Пр. № 83 - summary geochemical contributions by elements (green fill), according to the Order No 83 of Ministry of Natural Resources (Order..., 2020). OM is the total mineralization. ГХВ are ranked in descending order for the station with the lowest wastewater contribution (art. 100L(b)).

Водные вклады чистых речных вод в литорали (*Part_riv^lit*) – это разница между водными вкладыми загрязнённых речных и сточных вод в литорали:

$$Part_{riv}^{lit} = Part_{riv_lit} - Part_{ww_lit} \quad (11).$$

В первом приближении будем считать, что водные вклады чистых речных вод в устье такие же, как на участке реки выше сброса сточных вод, т.е.:

$$Part_{riv}^{lit} = Part_{riv}(up) \quad (12).$$

Эти вклады будут отличаться, если есть существенное влияние притоков реки (боковые русла, протоки) на участке между трубой сброса сточных вод и устьем, где мы и определяем итоговый состав смешения речных и сточных вод (ст. Riv, рис. 1). На космоснимке (см. рис. 1) такие притоки видны, однако на местности визуально эти водотоки с сильно замедленным течением (стоячая вода, заболоченность) и не должны существенно влиять на величину водного стока основного русла реки. Однако они могут оказывать заметное влияние на элементный состав (как это будет показано ниже) устьевых вод по некоторым элементам (Fe, Mn и др.) даже при небольшом дренаже, ввиду специфики их накопления в стоячих водотоках (Чебыкин и др., 2012). Но, поскольку, такие элементы заведомо исключаются из расчёта водных вкладов, то оценка последних, с использованием описанного выше подхода (5)-(8), вполне достоверна.

Водные вклады байкальских вод в литорали вычисляются простым пересчётом:

$$Part_{bw_lit} = 1 - Part_{riv_lit} \quad (13).$$

Водные вклады чистых речных и байкальских вод представлены на рис. 7 и 8, они необходимы для вычисления их геохимических вкладов (ГХВ) по отдельным компонентам в объектах смешения.

2.3. Геохимические вклады

Очевидно, что геохимические вклады (ГХВ) по отдельным компонентам от источников смешения (сточные, речные и байкальские воды) могут быть как больше, так и меньше, чем их водные вклады в объекты смешения (*Part_source_mixture*). Это зависит от степени загрязнённости источников смешения относительно объектов смешения. ГХВ представляет собой долю компонента (химического элемента, вещества, суммы веществ) источника смешения от общего содержания данного компонента в объекте смешения и рассчитывается с учетом возможного неконсервативного поведения компонентов на физико-химических и биогеохимических барьерах (Чебыкин и др., 2024а, Чебыкин и др., 2025 (в печати)), т.е. предполагается, что сначала все компоненты смешиваются чисто механически, а возможное неконсервативное поведение элементов, меняющее их концентрацию в объектах смешения (как в сторону уменьшения, так и увеличения), происходит уже позже. Т.е. используются расчётные, а не измеренные концентрации компонентов в объектах смешения:

$$ГХВ = \frac{Part_{source_mixture} \times C_{i_source}}{C_{i_calc_mixture}} \quad (14),$$

где C_{i_source} – концентрация компонента i в источнике смешения, $C_{i_calc_mixture}$ – концентрация компонента i в объекте смешения, рассчитанная по принципу (5), т.е. в универсальной форме для любых типов смешения. При этом используются водные вклады основных источников, полученные согласно описанным выше алгоритмам.

Сектор	Прибрежная вода		50 L м				65 м				80 L м				100 L м			100 м			100 R м			200 м
Part bw, %	37	84	88	69	87	94	84	61	95	57	37	87	88	96	92	73	82	91	92	93	92			
Ошибка Part bw, %	2.5	0.3	0.2	0.6	0.2	0.1	0.2	2.0	0.1	1.4	4.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.0	0.2	0.1			

Элемент \ Станция	RivCW	100RCW	50L(s)	50L(m)	50L(b)	65(s)	65(m)	65(b)	80L(s)	80L(m)	80L(b)	100L(s)	100L(m)	100L(b)	100(s)	100(m)	100(b)	100R(s)	100R(m)	100R(b)	200(s)
Mn	0.32	2.8	3.7	1.2	3.5	7.5	2.9	0.84	8.6	0.72	0.32	3.4	3.8	12	6.0	1.4	2.5	5.0	6.1	6.9	5.8
Si	3.4	24	30	12	28	47	24	8.5	51	7.3	3.4	28	30	60	41	14	22	36	42	45	40
Fe	4.1	28	34	14	32	52	28	10	56	8.8	4.2	32	35	64	46	16	26	41	47	50	45
Ga	4.5	30	36	15	34	54	30	11	58	9.6	4.5	34	37	66	48	18	27	43	49	52	47
Ce	5.3	34	41	18	39	59	34	13	63	11	5.4	38	41	70	53	20	31	48	54	57	52
HREE	7.8	44	51	24	49	68	44	18	72	16	7.9	48	51	78	63	28	41	58	64	66	62
LREE	9.3	48	55	28	53	72	49	21	75	19	9.4	53	56	81	67	32	45	63	68	70	66
REE	9.5	49	56	29	54	72	49	22	76	19	9.6	54	57	82	67	32	46	63	68	71	67
MREE	10.0	50	57	30	55	74	51	23	77	20	10	55	58	82	69	33	47	64	69	72	68
Y	10	50	58	30	56	74	51	23	77	20	10	55	58	83	69	34	47	65	70	72	68
La	11	54	61	33	59	76	54	25	79	22	12	59	62	84	72	37	51	68	72	75	71
P	12	56	63	35	61	78	57	27	81	24	12	61	64	86	74	39	53	70	74	76	73
Ge	15	62	68	40	66	82	62	32	84	28	15	66	69	88	78	44	59	74	78	80	77
Ti	16	64	70	42	68	83	64	34	85	30	16	68	71	89	79	47	61	76	80	82	79
Co	16	64	71	43	69	83	65	34	85	31	17	68	71	89	80	47	61	76	80	82	79
Cr	17	65	72	44	70	84	66	35	86	32	17	69	72	90	80	48	62	77	81	83	80
Al	17	66	72	45	70	84	66	36	86	32	18	70	72	90	81	49	63	78	81	83	80
Ba	17	66	72	45	70	84	66	36	86	32	18	70	72	90	81	49	63	78	81	83	80
Zr	18	66	72	45	71	84	67	36	86	33	18	70	73	90	81	49	63	78	81	83	80
Cs	19	68	74	47	72	86	69	38	87	35	19	72	75	91	82	52	65	79	83	84	82
Mg	21	71	77	51	75	87	71	42	89	38	21	75	77	92	84	55	68	81	85	86	84
Rb	23	73	78	53	77	88	73	44	90	40	23	76	79	93	85	57	70	83	86	87	85
OM	23	74	79	54	77	89	74	45	90	41	24	77	79	93	86	58	71	83	86	88	86
Ca	24	74	79	54	78	89	74	45	90	41	24	77	79	93	86	58	71	84	86	88	86
Cl	24	74	80	55	78	89	75	46	90	42	25	78	80	93	86	59	72	84	87	88	86
S	27	77	82	59	81	90	78	50	92	46	28	81	82	94	88	63	75	86	89	90	88
V	28	78	83	60	81	91	79	51	92	47	29	81	83	94	89	64	76	87	89	90	88
Cu	30	80	84	62	83	92	80	53	93	49	31	83	84	95	90	66	78	88	90	91	89
Sb	31	80	84	63	83	92	80	54	93	50	31	83	85	95	90	67	78	88	90	91	90
Sr	34	82	86	66	85	93	83	58	94	54	34	85	87	96	91	70	81	89	91	92	91
B	35	83	87	67	86	93	83	59	94	55	35	85	87	96	91	71	81	90	92	93	91
K	43	87	90	74	89	95	87	66	96	63	43	89	90	97	94	77	86	92	94	95	94
Ni	48	89	92	78	91	96	89	71	96	67	48	91	92	97	95	81	88	94	95	95	95
U	55	92	94	83	93	97	92	77	97	74	56	93	94	98	96	85	91	95	96	97	96
Li	56	92	94	83	94	97	92	77	97	74	57	93	94	98	96	85	91	96	96	97	96
Na	56	92	94	83	94	97	92	77	97	74	57	93	94	98	96	85	91	96	96	97	96
Br	57	92	94	83	94	97	92	78	97	75	57	94	94	98	96	86	91	96	96	97	96
I	64	94	96	87	95	98	94	83	98	80	65	95	96	99	97	89	94	97	97	98	97
W	68	95	96	89	96	98	95	85	98	83	69	96	96	99	98	91	95	97	98	98	98
Mo	74	96	97	92	97	99	96	88	99	86	74	97	97	99	98	93	96	98	98	99	98
As	79	97	98	94	98	99	97	91	99	90	79	98	98	99	99	95	97	98	99	99	99

Ошибка ГХВ bw, %	4-24	2-20	2-20	2-21	2-20	1-21	2-20	4-22	1-21	3-22	5-24	2-20	2-20	1-21	1-20	2-21	2-20	1-20	1-20	1-21	1-20
СГХВ bw, %	1058	2460	2615	1922	2573	2930	2473	1679	2986	1570	1068	2564	2628	3092	2839	2037	2390	2757	2851	2900	2825
Ошибка СГХВ bw, %	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	1.4	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
СГХВ bw/riv^	0.4	2.1	2.6	1.1	2.5	4.5	2.2	0.9	5.0	0.8	0.4	2.5	2.7	6.5	3.8	1.3	1.9	3.3	3.9	4.2	3.7
СГХВ bw/ww	5	27	35	14	33	64	28	10	73	9	5	32	36	98	52	16	25	45	54	60	51

the total mineralization. ГХВ are ranked in descending order of geochemical differences of polluted riverine waters relative to the background station (Riv*, see Fig. 2). СГХВ_bw/riv^ is the ratio of СГХВ of Baikalian and pure riverine estuarine waters; СГХВ_bw/ww is the ratio of СГХВ of Baikalian and wastewater.

Рис. 8. Тепловая карта геохимических вкладов (ГХВ, в %) байкальских вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабиха в сопоставлении с водными вкладами байкальских вод (Part_bw).

Примечание. СГХВ – суммарные геохимические вклады по всем элементам (редкоземельные элементы учтены общей суммой REE). ОМ – общая минерализация. ГХВ ранжированы по убыванию геохимических различий загрязнённых речных вод относительно фоновой станции (Riv*, см. рис. 2). СГХВ_bw/riv^ – отношение СГХВ байкальских и чистых речных устьевых вод; СГХВ_bw/ww – отношение СГХВ байкальских и сточных вод.

ГХВ	
> 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 %

Fig. 8. Heat map of geochemical contributions (ГХВ, in %) of Baikalian waters to the littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the Pokhabikha River in comparison with the water contributions of Baikalian waters (Part_bw).

Note. СГХВ – summary geochemical contributions for all elements (rare earth elements are accounted for by the total amount of REE). OM is

Рассчитанные геохимические вклады сточных, чистых речных и байкальских вод в объектах смешения представлены на рис. 6-8 в виде тепловых карт.

2.3.1. Геохимические вклады сточных вод

Из полученных данных следует, что максимальное влияние сточных вод (рис. 6) на р. Похабиху проявляется по P (73 %), рангом ниже по Cl (41 %), затем по Na (28 %), затем по I (20 %), K (16 %), Cs (13 %), Ni (11 %), Zr (11 %) и Ga (10 %). Вклады по остальным элементам составляют менее 10 %. Тот же самый набор основных загрязняющих элементов сточных вод, но с меньшими вкладами, характерен и для станций с большой долей загрязнённых речных вод в литорали ($Part_{riv_lit} > 27\%$): ст. RivCW, ст. 50L(m), ст. 65(b), ст. 80L(b), ст. 80L(m), ст. 100(m).

Для остальных станций литорали, где значительно преобладают байкальские воды ($Part_{bw_lit} > 80\%$, рис. 8) – картина распределения ГХВ сточных вод более сложная (рис. 6). Здесь состав основных загрязняющих компонентов почти тот же, за исключением того, что относительное влияние по Ni и I заметно уменьшается, а по Mn, Fe, Si, Rb Ge и В, наоборот, возрастает. Обращает внимание то, что ГХВ по Mn довольно высокий и почти постоянный на всех станциях (3,9-4,4 %). Слабая вариабельность ГХВ (максимум/минимум не более 2 раз) также характерна для Si, Fe, Ga, редкоземельных элементов, Y и P, наиболее высокая вариабельность (максимум/минимум = 4.0-4.4) наблюдается для I, W, Mo и As.

Наибольший суммарный геохимический вклад сточных вод ($CGXB_{ww}$) по всем информативным элементам (редкоземельные элементы учтены общей суммой REE, общая минерализация (ОМ) исключена из суммирования) получен для р. Похабихи (311 %). По мере разбавления загрязнённых речных вод в литорали байкальскими водами $CGXB_{ww_lit}$ падает. Он в значительной мере обусловлен водными вкладами сточных вод и имеет высокие значения для станций с относительно высокими значениями $Part_{ww_lit}$ ($> 0.27\%$): ст. RivCW – 218 %, ст. 50L(m) – 140 %, ст. 65(b) – 162 %, ст. 80L(b) – 217 %, ст. 80L(m)

– 172 %, ст. 100(m) – 129 %. Наиболее низкие $CGXB_{ww_lit}$ ($< 50\%$) характерны для станций с низкими водными вкладами сточных вод ($Part_{ww_lit} < 0.07\%$): 65(s), 80L(s), 100L(b) и 100R(b).

Суммарные геохимические вклады сточных вод по элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды (Приказ..., 2020) (на рис. 6 они выделены зелёной заливкой) – ($CGXB_{ww_Pr}$ № 83), немного меньше (на 13-27%) соответствующих $CGXB_{ww}$ по всем информативным элементам. Для р. Похабихи $CGXB_{ww_Pr}$ № 83 составляет 275 %.

2.3.2. Геохимические вклады чистых речных вод

Геохимические вклады чистых речных вод в устье р. Похабихи (см. рис. 7) получены двумя способами. Вначале были вычислены концентрации элементов в чистых речных водах в устье ($C_{i_riv}^{\wedge}$) исходя из известного водного вклада сточных вод ($Part_{ww_riv} = 0.0098$, см. табл. 2) и измеренных концентраций элементов в сточных (C_{i_ww}) и загрязнённых речных (C_{i_riv}) водах:

$$C_{i_riv}^{\wedge} = C_{i_riv} - C_{i_ww} \times Part_{ww_riv} \quad (15)$$

Эти полученные концентрации приняты как C_{i_source} в формуле (14).

Затем, в первом способе, концентрации элементов в объекте смешения (в р. Похабихе в устье, $C_{i_calc_mixture} = C_{i_calc_riv}$) рассчитаны исходя из консервативного смешения сточных и условно чистых речных вод (выше сброса стоков) согласно (5). ГХВ по (14) принимают вид:

$$GXB_{riv}^{\wedge_riv'} = Part_{riv}^{\wedge_riv} \times C_{i_riv}^{\wedge} / C_{i_calc_riv} \quad (16),$$

где $Part_{riv}^{\wedge_riv}$ – водный вклад чистых речных вод в устье, вычисленный по (9), принимая допущение (12), он оценивается величиной 99.02% (см. табл. 2). На рис. 7, $GXB_{riv}^{\wedge_riv'}$, рассчитанные по этому способу, находятся в столбце Riv'.

Во втором способе использованы реально измеренные концентрации элементов в устье

р. Похабихи (C_{i_riv}). GXB по (14) принимают вид:

$$\frac{GXB_{riv}^{lit}}{C_{i_riv}} = \frac{Part_{riv}^{lit}}{C_{i_riv}} \times \frac{GXB_{riv}^{riv}}{C_{i_riv}} \quad (17)$$

На рис. 7, GXB_{riv}^{lit} , рассчитанные по этому способу, находятся в столбце Riv.

Эти два способа расчёта отличаются тем, что второй учитывает влияние других источников поступления элементов (притоки и т.п.) в русло реки на участке ниже сброса сточных вод, и, если таковые имеются и оказывают влияние на геохимический состав устьевых вод, то мы это заметим, сравнивая GXB_{riv}^{riv} по (16) и GXB_{riv}^{lit} по (17). Более простой способ это заметить – сравнить концентрации $C_{i_calc_riv}$ и C_{i_riv} , однако сопоставление геохимических вкладов визуально более наглядно (рис. 7). Видно, что по некоторым элементам GXB_{riv}^{riv} больше 100 %, что свидетельствует о влиянии дополнительных источников поступления на участке реки ниже сброса сточных вод. Этими источниками, как указывалось выше, могут быть заболоченные протоки, в которых происходит мобилизация элементов, чувствительных к изменению окислительно-восстановительных условий (Fe, Mn), и некоторых других элементов, характерных для данных экотопов. Мы видим, что максимальный GXB_{riv}^{riv} по Fe – 369 %, далее по Sb (332 %), Mn (175 %), редкоземельным элементам как по отдельности (Ce – 154 %, La, 132 %) так и по группам (LREE – 137 %, MREE – 106 %, REE – 111 %), по В (129 %), Со (124 %), Zr (113 %), Al (109 %) и Ti (109 %). Небольшие превышения 100 % GXB_{riv}^{riv} по Ва (102 %) и Mg (101 %) в рамках ошибок определения недостоверны. Впрочем, это справедливо также для Ti и MREE. Для оценки степени дополнительного поступления элементов на участке ниже сброса стоков более правильно брать не

абсолютные величины GXB_{riv}^{riv} , а их отношения к GXB_{riv}^{lit} . Ряд по уменьшению этого отношения следующий: Fe (3.9), Sb (3.4), Mn (1.9), Ce (1.6), В (1.4), LREE (1.4), La (1.4), Со (1.3), Zr (1.3), REE (1.2), Ti (1.1), Al (1.1). Для остальных элементов это отношение близко к единице, или отличается от него не более чем на 20 % с перекрытием доверительных интервалов (т.е. различие между GXB_{riv}^{riv} и GXB_{riv}^{lit} не достоверно). Довольно странный результат получен для группы тяжёлых редких земель (HREE) – там отношение $GXB_{riv}^{riv} / GXB_{riv}^{lit} = 0.7$, т.е. эти элементы, наоборот, теряются на 30 % в условно чистых речных водах при прохождении участка от трубы сброса сточных вод до устья. Возможно, это связано с переоценкой точности определения этих ультраследовых элементов.

Очевидно, что GXB чистых речных вод в устье по большинству элементов будут значительно больше, чем GXB сточных вод, в виду большой разницы водных вкладов речных ($Part_{riv}^{lit} = 99.02\%$) и сточных ($Part_{ww_riv} = 0.98\%$) вод. Для большинства элементов GXB_{riv}^{lit} составляют более 90 %. Исключение составляют Р (27 %), Cl (58 %), Na (71 %), I (79 %), К (83 %), Cs (86 %), Ni (88 %), Zr (89 %) и Ga (89 %), которые в значительных количествах поступают со сточными водами.

Тепловые карты геохимических вкладов чистых речных (GXB_{riv}^{lit}) и байкальских (GXB_{bw_lit}) вод в литорали, рассчитанные по (14), представлены на рис. 7 и 8. Сравнивая их друг с другом, а также с GXB сточных вод (см. рис. 6), видно что основная «конкуренция» по большинству элементов в литорали определяется двумя главными источниками – речными и байкальскими водами с вклиниваем в эту «борьбу» некоторых элементов сточных вод, в основном Р и Cl, и в меньшей степени Na, Cs, Ga, К, Zr, I, Rb, Mn и Fe (рис. 9).

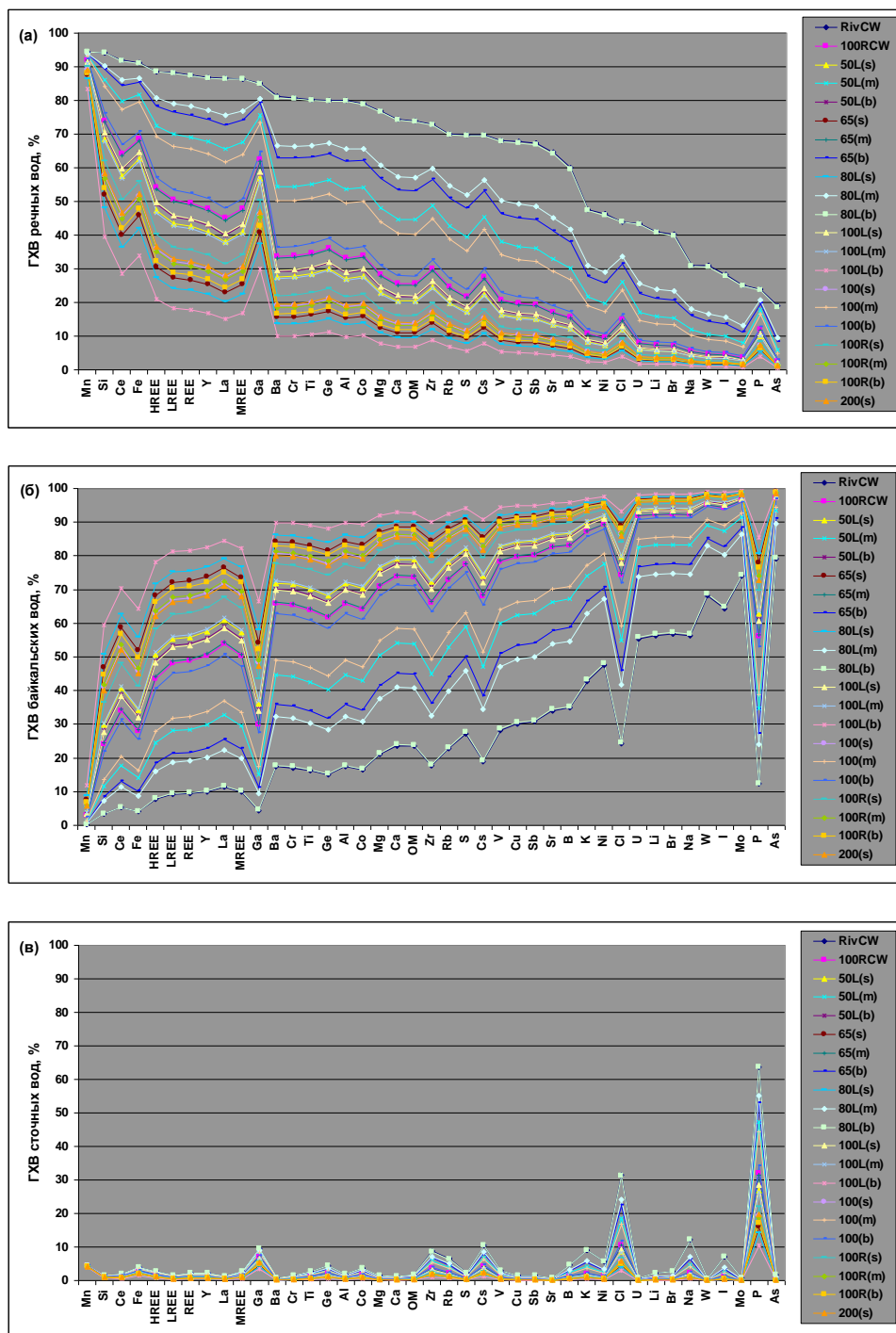


Рис. 9. Сравнение геохимических вкладов (ГХВ) чистых речных устьевых (а) байкальских (б) и сточных (в) вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабихи.

Примечание. Элементы ранжированы по убыванию ГХВ чистых устьевых речных вод для станции RivCW.

Fig. 9. Comparison of geochemical contributions (ГХВ) of pure riverine estuarine waters (a) Baikalian waters (b) and wastewater (c) to the littoral waters of Lake Baikal in the zone of influence of the Pokhabikha River.

Note. The elements are ranked in descending order by the ГХВ of clean estuarine riverine waters for the RivCW station.

Из полученных данных следует, что максимальное влияние чистых речных вод на литораль Байкала проявляется по Mn, ГХВ которого составляют 83-94 %, в зависимости от местоположения станций отбора проб (рис. 6, 9). Далее следуют Si (39-94 %), Fe (34-91 %), Ga (30-85 %), редкоземельные элементы (Ce, La, HREE, LREE, MREE, REE – 15-92 %), Y (17-87 %), Ge (11-80 %), Ti, Cr, Ba и Al (10-80 %). По остальным элементам максимальные ГХВ составляют менее 80 %, а минимальные ГХВ – менее 10 %. Пограничным элементом является Co, ГХВ которого находятся в интервале 10-79 % (см. рис. 9).

Суммарные геохимические вклады чистых речных вод ($CGXB_{riv}^{\wedge}$) на всех станциях на порядок больше, чем соответствующие СГХВ сточных вод (строка $CGXB_{riv}^{\wedge}/ww$, см. рис. 8). Они имеют те же закономерности распределения в литорали, что и СГХВ сточных вод (см. п. 2.3.1). Максимальный $CGXB_{riv}^{\wedge}$, очевидно, в р. Похабихе в устье (столбец Riv на рис. 8), он составляет 3158 %.

2.3.3. Геохимические вклады байкальских вод

В литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи, за исключением ст. RivCW и 80L(b), доминируют воды самого озера. На их долю ($Part_{bw}$) приходится более 57 % водной массы (см. рис. 8).

Основное влияние байкальских вод в литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи проявляется по As, Mo, W, I, Br, Na, Li и U, их ГХВ составляют 55-99 %. Довольно высокие ГХВ (12-97 %) характерны и для большинства других элементов Ni, K, B, Sr, Sb, Cu, V, S, Cl, Ca, OM, Rb, Mg, Cs, Zr, Ba, Al, Cr, Co, Ti, Ge и P. ГХВ редкоземельных элементов, Ga, Fe, Si и Mn варьируют в интервале 0.3-82 %.

Суммарные геохимические вклады байкальских вод в литорали ($CGXB_{bw}$)

варьируют в интервале 1058-3092 % (см. рис. 8). В большинстве случаев (для станций с водным вкладом байкальских вод $Part_{bw} \geq 69$ %), они превышают СГХВ чистых речных вод ($CGXB_{bw}/riv^{\wedge}$, рис. 8) в 1.3-8.3 раза. На станциях RivCW и ст. 80L(b), где доминируют речные воды ($Part_{riv}^{\wedge}_{lit} = 62-63$ %, рис. 7) $CGXB_{bw}$, наоборот, в два раза меньше $CGXB_{riv}^{\wedge}$. На ст. 50L(m) и ст. 65(b) с соотношением водных вкладов $Part_{riv}^{\wedge} / Part_{bw} = 39/61$ и $43/57$, СГХВ речных и байкальских вод почти одинаковые (~ 1600-1700 %).

СГХВ байкальских вод больше СГХВ сточных вод на всех станциях литорали в 5-98 раз (строка $CGXB_{bw}/ww$, рис. 8).

2.4. Сравнение с результатами 2022 г.

2.4.1. Геохимические составы речных и сточных вод

На рис. 10 представлено сравнение геохимических составов сточных вод КОС г. Слюдянки и условно чистых вод р. Похабихи (выше сброса), полученных в данной работе (01 августа 2024 г.) с результатами 2022 г. (06 сентября). Сезонная разница в межгодовой динамике составляет один месяц. Видно, что в межгодовой динамике геохимические составы обоих водных объектов меняются слабо – по большинству элементов разница в содержаниях составляет менее 50 %.

Состав сточных вод наиболее стабильный. Более существенные различия здесь наблюдаются только по небольшому числу трудно-растворимых следовых элементов (в размах): Ga (1.7), концентрация которого больше, и Cr (2.4), Ti (1.9) и Zr (1.7) концентрации которых меньше, чем в 2022 г. Колебания концентраций этих элементов, скорее всего, обусловлено вариациями тонкодисперсной взвеси.

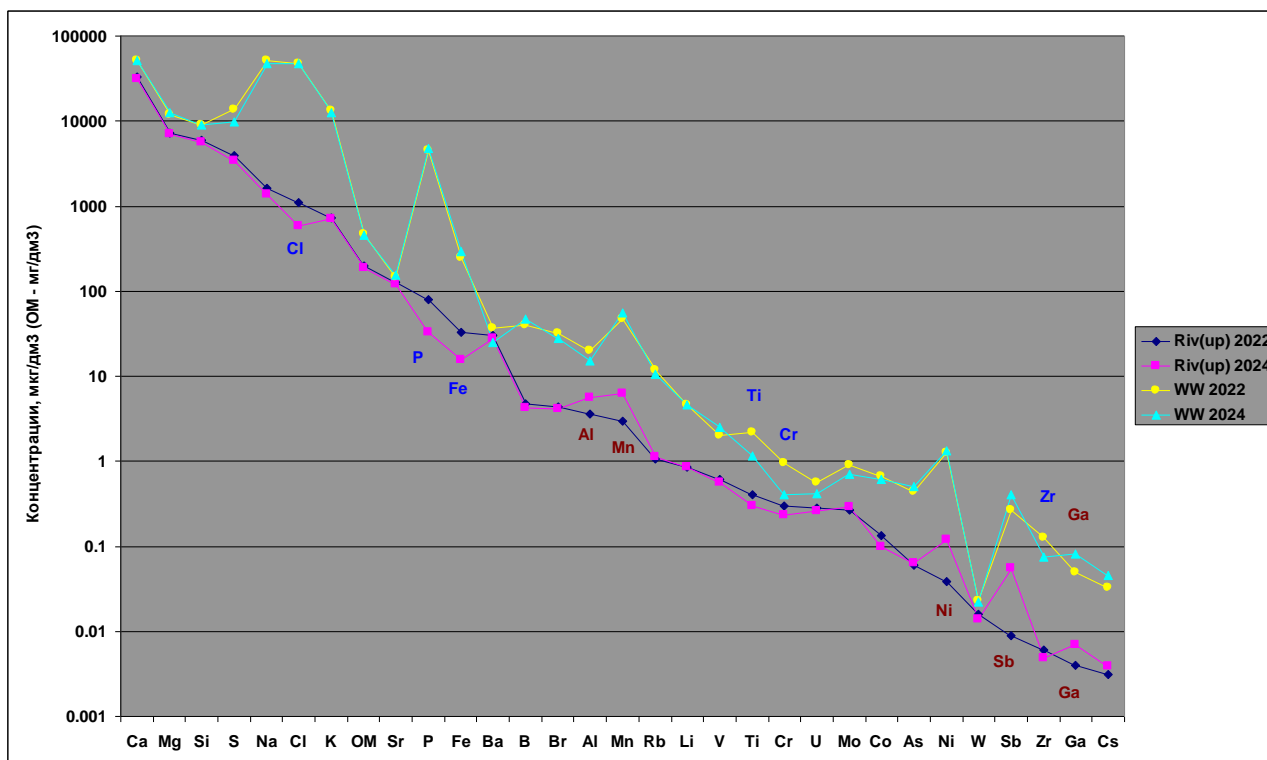


Рис. 10. Сравнение геохимических составов сточных вод КОС г. Слюдянка (WW) и условно чистых вод р. Похабиха (выше сброса сточных вод, ст. (Riv(up))) в 2022 и 2024 гг.

Примечание. Элементы, концентрации которых различаются в 1.5 и более раз отмечены дополнительными символами: синие – в 2024 г. ниже, чем в 2022 г., коричневые – в 2024 г. выше, чем в 2022 г.

Fig. 10. Comparison of geochemical compositions of wastewater from Slyudyanka City WTF (WW) and conditionally pure waters of the Pokhabikha River (upstream of wastewater discharge – st. Riv(up)) in 2022 and 2024.

Note. Elements whose concentrations differ by 1.5 or more times are marked with additional symbols: blue – lower in 2024 than in 2022, brown – higher in 2024 than in 2022.

Существенные различия речных вод по Sb (6.1), Ni (3.2), Mn (2.1), Ga (1.8) и Al (1.6), концентрации которых больше, и P (2.4), Fe (2.1) и Cl (1.9), концентрации которых меньше, чем в 2022 г., вероятно, связаны с изменениями водности реки и влиянием других факторов (взвешенное вещество, физико-химические и биогеохимическими процессы).

2.4. 2. Водные вклады источников

Водные вклады загрязнённых речных вод (основная доля которых приходится на условно чистые устьевые речные воды) в поверхностные воды литорали Байкала в зоне ~ 50 м от уреза в 2024 г. (табл. 3, рис. 5, ст. 50L(s), ст. 65(s), ст. 100R(s)) были 6.4–12 %,

что в 2.2–5.6 раз больше, по сравнению с 2022 г. – 2.2–2.9 % (Чебыкин и др., 2024а), что свидетельствует о более высокой водности р. Похабихи в 2024 г и/ или более замедленном водообмене в литорали. Мы полагаем, что условия смешения вод в литорали в периоды опробования в 2022 и 2024 гг. были близкими, поскольку, в обоих случаях был почти штиль. Однако температура поверхностных вод в литорали в 2022 г. была 6.7 °С, а в 2024 г. почти в два раза выше (11–12 °С), в то время как температура речных вод в устье в 2022 г. (7.6 °С) и в 2024 г. (8.6 °С) была почти одинаковой. Следует заметить, что в 2024 г. температура речных вод была ниже литоральных, а в 2020 г, наоборот, выше.

Необходимо привлекать гидрологические расчёты, чтобы оценить, как температурный режим будет сказываться на интенсивности смешения вод. В первом приближении будем считать, что он не оказывает существенного влияния. Если мы принимаем, что увеличение водных вкладов речных вод литорали в 2024 г. обусловлены большей водностью р. Похабихи, то логично предположить, что более низкие водные вклады сточных вод в речные в 2024 г. ($Part_{ww_riv_2024} = 0.98\%$) по сравнению с 2022 г. ($Part_{ww_riv_2022} = 1.75\%$) объясняются их более сильным разбавлением.

Тем не менее, водные вклады сточных вод в литорали Байкала в рассматриваемом секторе в 2024 г. (0.063–0.122 %, табл. 3) были в 2-3 раза больше, чем в 2022 г. (0.039–0.05 %), что свидетельствует о том, что эффект водности реки превышает эффект разбавления сточных вод. Те же закономерности наблюдаются и в распределении ГХВ и СГХВ сточных вод (см. п. 2.4.3.1). Не исключено также, что поток сточных вод в 2024 г. на момент исследования был больше, чем в 2022 г. Для выявления динамики сброса сточных вод КОС г. Слюдянки и вариаций их геохимического состава требуется проведение более детальных мониторинговых исследований с почасовым и суточным отбором проб. Следует учитывать, что процессы смешения вод в литорали сложные и зависят от физических и гидрометеорологических условий на момент исследования, поэтому для получения более объективных оценок по влиянию водных источников на литораль Байкала необходимо в тот же период проводить мониторинговые исследования и в самой литоральной зоне.

Соотношение между водными вкладами чистых устьевых речных (riv^{\wedge}) и сточных (ww) вод на всех станциях в литорали будет таким же, как и в р. Похабихе в устье, оно рассчитывается из полученных водных вкладов сточных вод в речные ($Part_{ww_riv_2022} = 1.75\%$, $Part_{ww_riv_2024} = 0.98\%$). Очевидно, что отношение вкладов $Part_{riv^{\wedge}}/ww$ в 2024 г. (101) было почти в два раза больше,

чем в 2022 (56). В обоих случаях водные вклады чистых речных вод значительно превышают водные вклады сточных вод.

Формирование литоральных вод Байкала в зоне влияния р. Похабихи происходит за счёт смешения двух главных водных источников – речных и байкальских вод. В литорали Байкала в секторе ~ 50 м от уреза основная доля поверхностных вод приходится на байкальские воды. В 2022 г. их водные вклады ($Part_{bw_lit_2022}$) составляли 97–98 % (рис. 11), что немного больше (на 4–12 %), чем в 2024 г. ($Part_{bw_lit_2024} = 88–94\%$, рис. 8) за счёт более низких водных вкладов речных вод, вероятно, вследствие более низкой водности р. Похабихи.

В исследуемом секторе водные вклады байкальских вод значительно превышали водные вклады речных вод и ещё в большей степени – водные вклады сточных вод: $Part_{bw/riv^{\wedge}}_{2022} = 34–35$, $Part_{bw/ww}_{2022} = 1913–2501$; $Part_{bw/riv^{\wedge}}_{2024} = 7–15$, $Part_{bw/ww}_{2024} = 721–1495$.

2.4.3. Геохимические вклады источников

Ранее, по результатам экспедиции 2022 г., были получены и описаны геохимические вклады только сточных вод КОС г. Слюдянки в р. Похабиху и в поверхностные воды литорали Байкала в зоне её влияния (Чебыкин и др., 2024а). В данном исследовании мы также определили водные и геохимические вклады чистых речных и байкальских вод. Вся полученная информация представлена на рис. 11.

2.4.3.1. Геохимические вклады сточных вод

В 2022 г. максимальное влияние сточных вод КОС г. Слюдянки на р. Похабиху было по Р (56 %), рангом ниже по Cl (43 %), Sb (39 %) и Na (36 %), затем по Zr (25 %), K (24 %), Cs

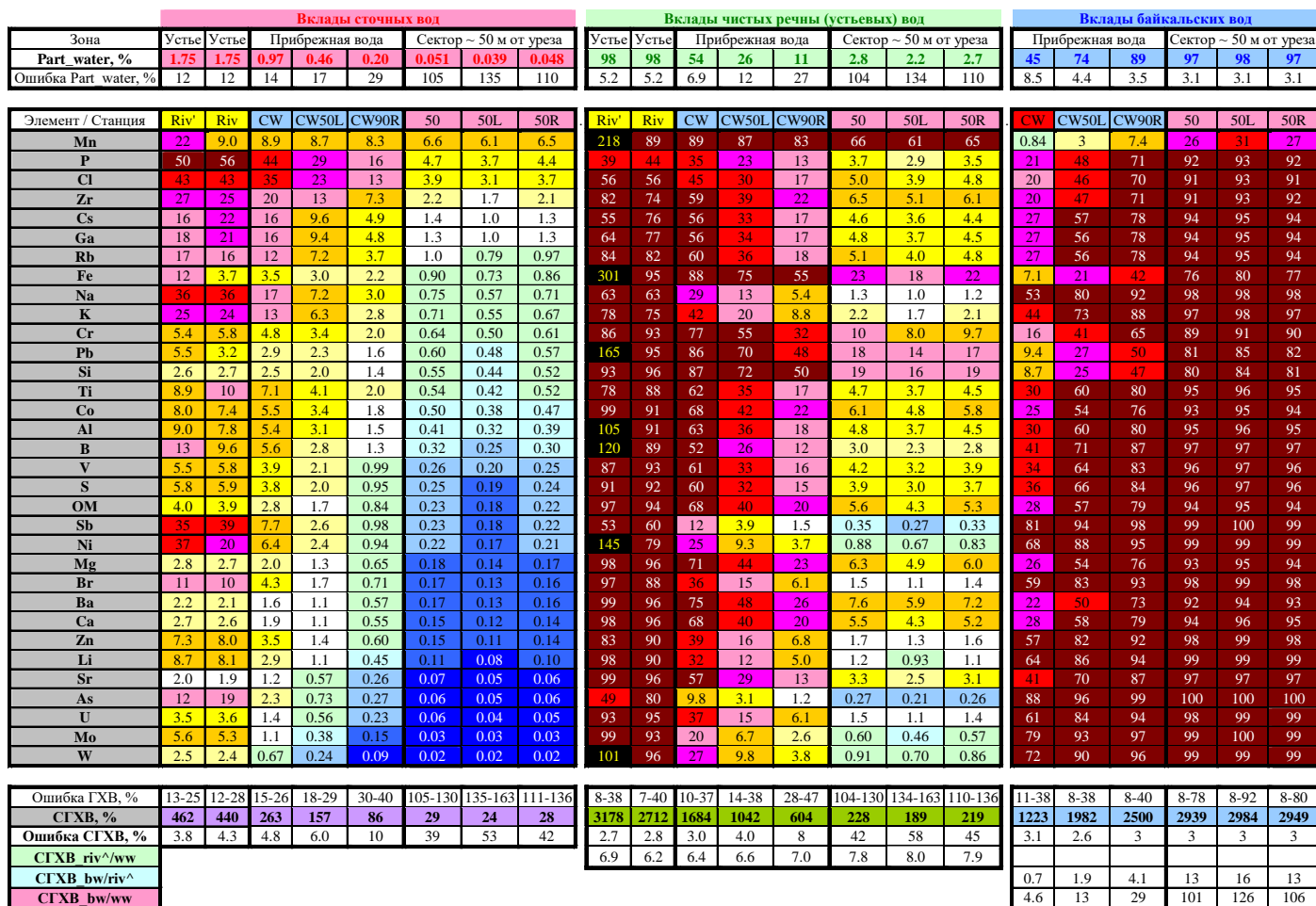


Рис. 11. Тепловая карта геохимических вкладов (GXВ, в %) сточных и чистых речных вод в р. Похабику, а также сточных, чистых речных устьевых и байкальских вод в литоральные воды Байкала в зоне влияния р. Похабики в сопоставлении с их водными вкладами (Part_water).

Примечание. CGXB – суммарные геохимические вклады по всем информативным элементам. OM – общая минерализация. GXВ ранжированы по убыванию GXВ сточных вод в секторе ~ 50 м от уреза. CGXB_riv^ww – отношение CGXB чистых речных и сточных вод; CGXB_bw/riv^ – отношение CGXB байкальских и чистых речных вод; CGXB_bw/ww – отношение CGXB байкальских и сточных вод.

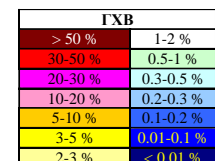


Fig. 11. Heat map of geochemical contributions (GXВ, in%) of wastewater and pure riverine waters into the Pokhabikha River, as well as wastewater, pure riverine estuarine waters and Baikalian waters to the littoral waters of Lake Baikal in the Pokhabikha River impact zone in comparison with their water contributions (Part_water).

Note. CGXB – summary geochemical contributions for all informative elements. OM is the total mineralization. CGXB is ranked in descending order of CGXB of wastewater in the sector ~ 50 m from the edge. CGXB_riv^ww – ratio of the CGXB of pure riverine estuarine waters and wastewater; CGXB_bw/riv^ – ratio of the CGXB of Baikalian and pure riverine estuarine waters; CGXB_bw/ww is the ratio of the CGXB of Baikalian waters and wastewater.

(22 %), Ga (21 %) и Ni (20 %), затем по As (19 %), Rb (16 %), Br (10 %) и Ti (10 %). Вклады по остальным элементам составляли менее 10 %. Это почти тот же набор основных загрязнителей, что и в 2024 г. (см. рис. 6).

При сравнении GXB_{ww_riv} в 2022 и 2024 гг. видно, что по большинству общих информативных элементов $GXB_{ww_riv_2022}$ были больше, чем $GXB_{ww_riv_2024}$ (в 1.3–20 раз), за исключением фосфора, ГХВ которого в 2022 г. были в 1.3 раза меньше, чем в 2024 г., а также Fe и Cl, ГХВ которых были почти одинаковыми ($GXB_{Fe_riv} = 3.7\text{--}4\%$, $GXB_{Cl_riv} = 41\text{--}43$). Суммарный геохимический вклад сточных вод КОС г. Слюдянки в р. Похабиху по общим информативным элементам в 2022 г. был также больше (440 %), чем в 2024 г. (279 %), в 1.6 раза. Очевидно, это связано с тем, что водные вклады сточных вод в р. Похабиху в 2022 г. были больше (см. п. 2.4.2).

Наибольшие геохимические вклады сточных вод в поверхностные воды литорали в секторе ~ 50 м от уреза в 2022 г. ($GXB_{ww_lit_2022}$) были по Mn (6.1–6.6 %), P (3.7–4.7 %), Cl (3.1–3.9 %), Zr (1.7–2.2 %), Cs (1.0–1.4 %), Ga (1.0–1.3 %), и Rb (0.8–1.0 %). Вклады по остальным элементам на всех станциях были менее 1.0 %.

Среди общих информативных элементов в 2024 г. в этом же секторе наибольшие ГХВ сточных вод в поверхностные воды литорали ($GXB_{ww_lit_2024}$) были по P (16–27 %), Cl (4.6–8.5 %), Ga (4.6–6.4 %), Mn (4.1–4.3 %), Cs (1.9–3.4 %), Fe (1.9–2.6 %), Zr (1.6–2.9 %), Rb (1.0–1.8 %), Na (0.8–1.7 %), K (0.8–1.6 %), Co (0.7–1.3 %) и Si (0.8–1.1 %). Вклады по остальным элементам на всех станциях были менее 1.0 %. Т.е., в 2024 г. к списку основных загрязнителей 2022 г. добавились Fe, Na, K, Co и Si, а сами ГХВ стали больше (в 1.5–7.3 раза), за исключением Mn, ГХВ которого в 2024 г. были, наоборот, в 1.4–1.6 раз меньше, чем в 2022 г. На отдельных станциях GXB_{Zr_lit} в 2024 г. были немного меньше (в 1.3 раза), чем в GXB_{Zr_lit} в 2022 г.

Суммарный геохимический вклад сточных вод КОС г. Слюдянки в поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи в секторе 50 м от уреза по общим информативным элементам в 2024 г. был также

больше (43–70 %), чем в 2022 г. (24–29 %), в 1.5–3 раза. Такая ситуация в литорали подтверждает тот факт, что фактор водности реки более значим, чем фактор разбавления сточных вод речными (см. п. 2.4.2).

2.4.3.2. Геохимические вклады речных вод

В 2022 г. геохимические вклады чистых речных вод в устье р. Похабихи, рассчитанные из условия консервативного смешения элементов по (16) ($GXB_{riv^{\wedge}riv}$) значительно превышают 100 % по Fe (301 %), Mn (218 %), Pb (165 %), Ni (145 %), B (120 %) и Al (105 %) (рис. 11, столбец Riv'), что свидетельствует о влиянии дополнительных источников поступления этих элементов на участке реки ниже сброса сточных вод. Интенсивность поступления элементов $GXB_{riv^{\wedge}riv} / GXB_{riv^{\wedge}riv}$ убывает в следующей последовательности: Fe (3.2), Mn (2.4), Ni (1.9), Pb (1.7), B (1.4) и Al (1.2). В оба периода (2022 и 2024 гг.) среди общих информативных элементов наиболее интенсивно из дополнительных источников поступают Fe, Mn и B. В 2024 г., в отличие от 2022 г., высокие значения $GXB_{riv^{\wedge}riv} / GXB_{riv^{\wedge}riv}$ обнаружены также для Sb (3.4) и отсутствие дополнительного поступления Ni (0.91).

В 2022 г., как и в 2024 г., геохимические вклады чистых речных вод в устье ($GXB_{riv^{\wedge}riv}$) по большинству элементов составляли более 90 %, за исключением P (44 %), Cl (56 %), Sb (60 %), Na (63 %), Zr (74 %), K (83 %), Cs (76 %), Ga (77 %), Ni (79 %), As (80 %), Rb (82 %), Br (88 %), Ti (88 %), B (89 %), Mn (89 %), Li (90 %) и Zn (90 %), которые привносятся сточными водами. Список исключений, по сравнению с 2024 г. более расширенный, поскольку водный вклад сточных вод тогда был больше ($Part_{ww_riv_2022} = 1.75$ %).

Наибольшие геохимические вклады чистых устьевых речных вод в поверхностные воды литорали в секторе ~ 50 м от уреза в 2022 г. ($GXB_{riv^{\wedge}lit_2022}$) были по Mn (61–66 %), Fe (18–23 %), Si (16–19 %), Pb (14–18 %) и Cr (8–10 %). Вклады по остальным элементам на всех станциях были менее 10 %.

Среди общих информативных элементов в 2024 г. в этом же секторе (ст. 50L(s), ст. 65(s), ст. 100R(s), рис. 1) наибольшие ГХВ чистых устьевых речных вод в поверхностные воды литорали ($GXB_{riv}^{lit}_{2024}$) были по Mn (88–91 %), Si (52–68 %), Fe (46–63 %), Ga (57–41 %), Ti (16–29 %), Co (16–28 %), Cr (16–28 %), Ba (16–28 %), Al (15–27 %), Zr (14–25 %), Mg (13–23 %), Cs (12–22 %), Ca (11–20 %), OM (11–20 %), Rb (11–20 %), S (9.2–17 %), V (8.7–16 %), Sb (8–15 %), Sr (7–13 %), Cl (6.4–12 %), B (6.3–12 %) и P (6–10 %). Вклады по остальным элементам на всех станциях были менее 10 % (рис. 7). Т.е., в 2024 г., в связи с относительно большими водными вкладами речных вод в воды литорали – в 2.2–5.6 раз ($Part_{riv}^{lit}_{2024} = 6.3–12\%$, $Part_{riv}^{lit}_{2022} = 2.2–2.8\%$), количество элементов со значимыми вкладами чистых устьевых речных вод было больше и сами ГХВ были больше (в 1.3–57 раза, ср. рис. 7 и 11).

Суммарный геохимический вклад чистых устьевых речных вод в поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи в секторе 50 м от уреза по общим (*) информативным элементам ($CGXB^*_{riv}^{lit}$) в 2024 г. был также больше (440–607 %), чем в 2022 г. (173–209 %), в 2–4 раза. Очевидно, что это связано с большим водным вкладом речных вод в литорали в 2024 г. по сравнению с 2022 г. (см. п. 2.4.2).

В 2022 г. в литорали Байкала $CGXB_{riv}^{lit}$ были в 6.2–8 раз больше суммарных геохимических вкладов сточных вод (рис. 11, строка $CGXB_{riv}^{ww}$). В 2024 г. этот показатель был немного выше – в 10–11 раз (рис. 7, строка $CGXB_{riv}^{ww}$). По общим информативным элементам для сектора ~ 50 м от уреза получены близкие величины: $CGXB^*_{riv}^{ww}_{2022} = 7.1–7.3$, $CGXB^*_{riv}^{ww}_{2024} = 9.5–10.2$. Это говорит о том, что в целом, по суммарным геохимическим характеристикам, влияние чистых вод р. Похабихи на литораль Байкала почти на порядок больше, чем сточных вод.

2.4.3.3. Геохимические вклады байкальских вод

Поскольку водные вклады байкальских вод в поверхностные воды литорали Байкала в секторе ~ 50 м от уреза в зоне влияния р. Похабихи в 2022 г. были немного больше ($Part_{bw}^{lit}_{2022} = 97–98\%$, рис. 11), чем в 2024 г. ($Part_{bw}^{lit}_{2024} = 88–94\%$, рис. 8), то логично ожидать, что и геохимические вклады байкальских вод в литорали в 2022 г. ($GXB_{bw}^{lit}_{2022}$) должны были быть больше, чем в 2024 г. ($GXB_{bw}^{lit}_{2024}$).

$GXB_{bw}^{lit}_{2022}$ практически по всем элементам были больше 90 %, за исключением Mn (26–31 %), Fe (76–80 %), Si (80–84 %) и Pb (81–85 %), рис. 11.

Число общих информативных элементов с высокими значениями $GXB_{bw}^{lit}_{2024}$ (> 90 %) были заметно меньше, чем в 2022 г. – только для трети списочного состава: As, Sb, Mo, W, Ni, Li, U, Br, Na, K, B, Sr и V. Их вклады были на 2–8 % меньше, чем $GXB_{bw}^{lit}_{2022}$. $GXB_{bw}^{lit}_{2024}$ по остальным элементам на всех станциях в секторе ~ 50 м от уреза были менее 90 %, наименьшие из них (< 60 %), как и в 2022 г., характерны для Mn (3.7–7.5 %), Si (30–47 %) и Fe (34–52 %), поскольку значительная их часть поступает с речными водами (см. п. 2.4.3.2).

Суммарный геохимический вклад байкальских вод в поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Похабихи в секторе 50 м от уреза по общим (*) информативным элементам ($CGXB^*_{bw}^{lit}$) в 2022 г. был также больше (2939–2984 %), чем в 2024 г. (2253–2513 %), в 1.2–1.3 раза.

В 2022 г. в литорали Байкала в секторе ~ 50 м от уреза $CGXB_{bw}^{lit}$ были в 13–16 раз больше чистых речных вкладов $CGXB_{riv}^{lit}$ (рис. 11, строка $CGXB_{bw}^{lit}/riv^{lit}$), а в прибрежной зоне эти показатели были меньше (0.7–4.1 раза). Относительно сточных вод $CGXB$ байкальских вод были на два порядка больше (в 101–126 раз) в секторе ~ 50 м от уреза и в 5–29 раз больше в прибрежной зоне.

В 2024 г. в поверхностных водах литорали в секторе ~ 50 м от уреза (ст. 50L(s), ст. 65(s),

ст. 100R(s), рис. 1) $СГХВ_{bw/riv}^{\wedge} = 2.6-4.5$, а $СГХВ_{bw/ww} = 35-64$ (рис. 8).

По общим (*) информативным элементам в исследуемом секторе СГХВ байкальских вод значительно превышали СГХВ речных вод и ещё в большей степени – СГХВ сточных вод: $СГХВ_{bw/riv}^{\wedge}_{2022} = 14-17$, $СГХВ_{bw/ww}_{2022} = 101-126$; $СГХВ_{bw/riv}^{\wedge}_{2024} = 3.4-5.7$, $СГХВ_{bw/ww}_{2024} = 32-58$.

Заключение

Установлена степень влияния водных источников по водным и геохимическим характеристикам на р. Похабику и прилегающую литораль оз. Байкал в 2022 и 2024 гг.

Водные вклады сточных вод КОС г. Слюдянки в р. Похабику в 2022 г. и 2024 г. составляли 1.75 % и 0.98 %, соответственно. Более низкие водные вклады сточных вод в 2024 г., вероятно, обусловлены большей водностью реки. Об этом свидетельствуют более высокие водные вклады загрязнённых речных вод в литорали Байкала (в поверхностных водах в секторе ~ 50 м от устья) в 2024 г. (6.4-12 %) по сравнению с 2022 г. (2.2-2.9 %). Несмотря на это водные вклады сточных вод в литорали озера в 2024 г. (0.063-0.122 %) были больше, чем в 2022 г. (0.039-0.05 %), что указывает на то, что эффект водности реки превышает эффект разбавления сточных вод.

Основное геохимическое влияние сточных вод на состав речных обнаружено по Р (56-75 %), Cl (41-43 %), Na (28-36 %), Zr (11-25 %), K (16-24 %), Cs (13-22 %), Ga (10-21 %) и Ni (11-20 %), геохимические вклады (ГХВ) остальных элементов были менее 10 %. В 2022 г. высокие ГХВ сточных вод обнаружены также по Sb (39 %), As (19 %), Rb (16 %), Br (10 %) и Ti (10 %), а в 2024 – по I (20 %). Суммарный геохимический вклад (СГХВ) сточных вод в речные по всем информативным элементам в 2022 г. был 440 %, что в 1,4 раза больше, чем в 2024 г. (311 %).

В 2024 г. влияние загрязнённых вод р. Похабики в литорали Байкала прослеживалось на всех глубинах в радиусе ~ 100 м от устья, а фронтально по поверхности достигало 200 м; в прибрежной зоне, вероятно, распространялось далее 100 м. Субквально разгрузка загрязнённых речных вод обнаружена на

удалении 65–80 м от устья. Водные вклады речных вод в придонном слое здесь составляли 39–63 %. Высокий водный вклад речных вод (63 %) также обнаружен в прибрежной воде напротив устья. На остальных участках литорали водные вклады речных вод составляли 3.9–4.3 %, т.е. там доминировали байкальские воды. Водные вклады сточных вод в литорали исследуемого сектора варьировали в диапазоне 0.04–0.62 % и были на два порядка меньше водных вкладов чистых речных вод.

В 2022 г. исследовались только поверхностные воды литорали в секторе ~ 50 м от устья и в прибрежной зоне на удалении до 90 м от устья. В прибрежной зоне водные вклады чистых речных вод составляли 11–54 %, а в секторе ~ 50 м от устья – 2.2–2.8 %. Водные вклады сточных вод варьировали в диапазоне 0.20–0.97 % и 0.04–0.05 % соответственно, и были в 56 раз меньше водных вкладов чистых речных вод.

Формирование водной массы литоральных вод Байкала в зоне влияния р. Похабики происходит в основном за счёт смешения двух главных источников – байкальских и чистых речных вод. Отношение их водных вкладов варьировало в пределах 0.8–45 раз в 2022 г. и 0.6–25 раз в 2024 г. На всех станциях водные вклады байкальских вод были значительно больше водных вкладов сточных вод: в 47–2501 раз в 2022 г. и в 59–2506 раз в 2024 г.

Геохимические вклады сточных вод в литорали Байкала более значимы, по сравнению с их водными вкладами. Основное влияние сточных вод здесь прослеживается по тем же элементам, что и для р. Похабики, но с меньшими ГХВ: в 2022 г. – Р (3.7-44 %), Cl (3.1–35 %), Na (0.6–17 %), Zr (1.7–20 %), K (0.6–13 %), Cs (1.0–16 %), Ga (1.0–16 %), Rb (0.8–12 %), Mn (6.1–8.9 %), Fe (0.7–3.5 %), Cr (0.5–4.8 %), Pb (0.5–2.9 %) и Si (0.4–2.5 %); в 2024 г. – Р (10–64 %), Cl (2.9–31 %), Na (0.5–12 %), Cs (1.2–11 %), Ga (3.4–9.6 %), K (0.5–9.0 %), Zr (1.0–8.6 %), I (0.3–7.0 %), Ni (0.3–5.6 %), а также Mn (3.9–4.4 %), Fe (1.4–3.8 %), Si (0.6–1.5 %), Rb (0.6–6.5 %), Ge (0.6–4.3 %) и В (0.3–4.6 %), ГХВ которых на участках с низкими водными вкладами сточных вод были относительно выше.

Несмотря на заметное влияние сточных вод, основной вклад в формирование геохимического состава литоральных вод Байкала в зоне влияния р. Похабихи вносят чистые речные и байкальские воды.

За исключением Р ГХВ чистых речных вод в литорали Байкала во всех случаях были больше, чем ГХВ сточных вод: в 1.3–50 раз в 2022 г. и в 1.4–116 раз в 2024 г. В 2022 г. основное влияние чистых речных вод было по Mn (61–89 %), Fe (18–88 %), Si (16–87 %) и Pb (14–86 %). По остальным элементам максимальные ГХВ были менее 80 %, а минимальные ГХВ – менее 10 %. Суммарные геохимические вклады чистых речных вод варьировали в интервале 189–1684 %, на всех станциях они были больше (в 6–8 раз) соответствующих СГХВ сточных вод. В 2024 г. основное влияние чистых речных вод было по Mn (83–94 %), Si (39–94 %), Fe (34–91 %), Ga (30–85 %), редкоземельным элементам (15–92 %), Y (17–87 %), Ge (11–80 %), Ti, Cr, Ba и Al (10–80 %). По остальным элементам максимальные ГХВ были менее 80 %, а минимальные ГХВ – менее 10 %. Суммарные геохимические вклады чистых речных вод варьировали в интервале 372–3158 %, на всех станциях они на порядок превышали соответствующие СГХВ сточных вод.

За исключением P, Cl, Mn и Ga ГХВ байкальских вод во всех случаях были больше, чем ГХВ сточных вод: в 1.03–5760 раз в 2022 г. и в 1.05–5480 раз в 2024 г. В 2022 г. максимальное влияние байкальских вод было по As, Sb, Mo, W, Ni, Li, U, Br, Zn и Na, их ГХВ составляли 53–100 %. Высокие ГХВ (16–98 %) были также и для большинства других элементов: K, B, Sr, S, V, Al, Ti, Ca, Cs, Ga, Rb, Mg, Co, Ba, P, Zr, Cl, и Cr. ГХВ Pb, Si, Fe, Si и Mn варьировали в интервале 0.8–85 %. Суммарные геохимические вклады байкальских вод варьировали в интервале 1222–2984 %, на всех станциях они были больше (в 5–106 раз) соответствующих СГХВ сточных вод. В 2024 г. максимальное влияние байкальских вод было по As, Mo, W, I, Br, Na, Li и U, их ГХВ составляли 55–99 %. Высокие ГХВ (12–97 %) были также и для большинства других элементов Ni, K, B, Sr, Sb, Cu, V, S, Cl, Ca, Rb, Mg, Cs, Zr, Ba, Al, Cr, Co, Ti, Ge

и P. ГХВ редкоземельных элементов, Ga, Fe, Si и Mn варьировали в интервале 0.3–82 %. Суммарные геохимические вклады байкальских вод варьировали в интервале 1058–3092 %, на всех станциях они были больше (в 5–98 раз) соответствующих СГХВ сточных вод.

В межгодовой динамике 2022 / 2024 гг. (с сезонной разницей в один месяц, сентябрь–август) геохимические различия чистых вод р. Похабихи, также как и сточных вод КОС г. Слюдянка по большинству химических элементов небольшие (< 50 %). Состав сточных вод наиболее стабильный. Более существенные различия здесь наблюдаются только по небольшому числу труднорастворимых следовых элементов (в размах): Cr (2.4), Ti (1.9), Ga (1.7) и Zr (1.7), колебания концентраций которых, скорее всего, обусловлено вариациями тонкодисперсной взвеси. Существенные различия чистых речных вод по Sb (6.1), Ni (3.2), P (2.4), Mn (2.1), Ga (1.8) и Al (1.6), вероятно, связаны с изменениями водности реки и влиянием других факторов (взвешенное вещество, физико-химические и биогеохимическими процессы).

В сточных водах КОС г. Слюдянка обнаружено превышение нормативов, установленных для сточных вод, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон Байкальской природной территории. В 2022 г. – по P (45 ПДК), Mn (4.7 ПДК) и V (2 ПДК); в 2024 г. – по P (96 ПДК), Mn (5.6 ПДК), Fe (2.9 ПДК) и V (2.5 ПДК).

Благодарности

Аналитические исследования выполнялись на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН, г. Иркутск)

Источник финансирования

Работа выполнена по государственному заданию ЛИИ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего

образования Российской Федерации (№ 121032300186-9).

Литература

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов // Состояние поверхностных вод – Среднесуточные расходы воды рек, ручьев, каналов по постам, куб. м/с: Инф. сист. 2023. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (дата обращения: 23.08.2023).

Гагаринова О.В. Водно-экологические проблемы центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Евразийский союз ученых. 2016. № 30-5. С. 7–11.

Грачёв М.А. Что грозит Байкалу? // В мире науки. 2015. № 1. С. 4–15.

Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года. Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_popul (дата обращения: 12.05.2023).

Мышляева Л.В., Краснощёков В.В. Аналитическая химия кремния (серия «Аналитическая химия элементов»). М: Наука. 1972. 212 с.

Поиск по данным Государственного водного реестра. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=208936> (дата обращения: 24.08.2023).

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 83 от 21.02.2020 г. 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. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202004230027>. (дата обращения: 08.07.2020).

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.

Ханаев И.В., Дзюба Е.В., Кравцова Л.С., Грачёв 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.

Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв 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.

Чебыкин Е.П., Дамбинов Ю.А., Сутурин А.Н. Многоэлементный анализ надшламовых вод карт-накопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для выбора стратегии ремедиации территории // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. Т. 84, № 4. С. 67-80.

Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Геохимический метод оценки влияния загрязнённых стоков на водные объекты на примере г. Слюдянка, р. Похабиха и Южного Байкала // Геосферные исследования. 2024а. № 4. С. 107–136. doi: 10.17223/25421379/33/7

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. Севербайкальска: оценка геохимическим методом // Антропогенная трансформация природной среды. 2024б. Т. 10, № 2. С. 82-102. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-82-102>. EDN ZWQKER.

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. 2025 (в печати).

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.V. 24, № 1. P. 19–31.

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

Malnik V., Masumi Y., Tomberg I., Molozhnikova E., Bukin Y., Timoshkin O. Lacustrine, wastewater, interstitial and fluvial water quality in the Southern Lake Baikal region // Journal of Water and Health. 2022. V. 20, № 1. P. 23–40.

R-ArcticNet // A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region. URL:

<https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/View-Point.pl?Point=6069> (дата обращения: 23.08.2023).

Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. Vol. 173. P. 291–303.

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. V. 58. P. 277–288.

References

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

Automated information system of state monitoring of water objects. Surface water condition – Average daily water discharge of rivers, streams, channels by posts, cubic meters/s: Inf. syst. 2023. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (Date of accessed: 23.08.2023). In Russian.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. Modern state of water in the Selenga river at the territory of Russia over major components and trace elements // *Chemistry for Sustainable Development*. 2012. 20(5). pp. 613–631. In Russian.

Chebykin E.P., Dambinov Yu.A., Suturin A.N. Multielemental analysis of above slime waters in the accumulation cells of Baikalsk Pulp and Paper Plant for the choice of territory remediation strategy // *Water and ecology*. 2020. 84(4). pp. 67–80, in Russian DOI:10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80.

Chebykin E.P., Kulikova N.N., Likhoshway Ye.V., Suturin A.N. 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*. 2024a. 4. pp. 107–136. In Russian. doi:10.17223/25421379/33/7.

Chebykin, E., Kulikova, N., Likhoshway, Y. and Suturin, A. 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* 2024b. 10(2). pp. 82–102. In Russian .doi:10.17072/2410-8553-2024-2-82-102. EDN ZWQKER.

Chebykin E.P., Kulikova N.N., Likhoshway Ye.V., Suturin A.N. 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*. 2025 In press. (In Russian).

Gagarinova O.V. Water-ecological problems of the Central Ecological Zone of the Baikal Natural Territory // *Eurasian Union of Scientists*. 2016. 30-5. pp. 7–11. In Russian.

Grachev M.A. What threatens Baikal? // *In the World of Science*. 2015. 1. pp. 4–15. In Russian.

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

Khanaev I.V., Dzyuba E.V., Kravtsova L.S., Grachev M.A. 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*. 2016. 467(1). pp. 63–641. DOI: 10.7868/S0869565216070306.

Malnik V., Masumi Y., Tomberg I., Molozhnikova E., Bukin Y., Timoshkin O. Lacustrine, wastewater, interstitial and fluvial water quality in the Southern Lake Baikal region // *Journal of Water and Health*. 2022. 20(1). pp. 23–40. DOI:10.2166/wh.2021.064.

Myshlyaeva L.V., Krasnoshchekov V.V. Analytical chemistry of silicon (series "Analytical chemistry of elements"). Moscow: Publishing house "Nauka". 1972. 212 p. In Russian.

Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 83 dated 02.21.2020 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.: URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202004230027>. (Date of accessed: 08.07.2020). In Russian.

R-ArcticNet. A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region. URL: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/View-Point.pl?Point=6069> (Date of accessed: 23.08.2023).

Results of the All - Russian Population Census 2020 // Federal State Statistics Service of the Russian Federation. URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_popul (Date of accessed: 12.05.2023). In Russian.

Search according to the State Water Register. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=208936> (Date of accessed: 24.08.2023). In Russian.

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. 58. pp. 277–288. DOI: 10.1016/S0584-8547(02)00157-X.

Suturin A.N., Chebykin E.P., Mal'nik V.V., Khanaev I.V., Minaev A.V., Minaev V.V. The role of anthropogenic factors in the development of ecological stress in Lake Baikal littoral (the Listvyanka settlement lakescape) // Geography and Natural Resources. 2016. 6. pp. 43–54. In Russian. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(43-54).

Чебыкин Евгений Павлович,
кандидат химических наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
ведущий специалист,
email: epcheb@yandex.ru

Chebykin Eugene Pavlovich,
candidate of Chemical Sciences,
664033, Irkutsk, st. Lermontova, d. 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
Leading Specialist,
email: epcheb@yandex.ru

Куликова Наталья Николаевна,
кандидат биологических наук,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,

старший научный сотрудник,
email: kulikova@lin.irk.ru

Kulikova Natalya Nikolaevna,
candidate of Biological Sciences,
664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
Senior Researcher,
email: kulikova@lin.irk.ru

Сутурин Александр Николаевич,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
Зав. лабораторией биогеохимии,
email: san@lin.irk.ru

Suturin Alexander Nikolaevich,
candidate of Geological and Mineralogical,
Head of Laboratory of Biogeochemistry,
664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: san@lin.irk.ru