



Научная статья

УДК 556.332.629

EDN: AVXHJX

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-4-441-456



Оценка воздействия Бабхинского полигона шламонакопителей на подземные воды прибрежной зоны озера Байкал

Л.И. Аузина^{a✉}

^aИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Основной целью работы являлся анализ современного состояния распространения загрязняющих веществ в районе Бабхинского полигона шламонакопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. Для решения поставленной задачи были проанализированы многолетние данные, отражающие химический состав природных и надшламовых вод в различные периоды работы комбината и после его закрытия, с последующим моделированием и оценкой геолого-структурных и гидрогеологических условий территории, технологических особенностей инженерных сооружений и состава сточных вод, в совокупности повлиявших на характер и степень распространения загрязнителей в прибрежной зоне озера Байкал. В результате проведенного анализа сделаны выводы о том, что наиболее высокие концентрации имеют следующие показатели: свинец, железо, мышьяк, повышенная мутность и цветность воды, при этом максимальное загрязнение сосредоточено в пределах территории карты № 14, а также на приграничной площади между территориями карт № 14 и 13, находящимися на расстоянии около 1,5 км от уреза воды озера Байкал. Сложившаяся ситуация обусловлена тем, что при закрытии Байкальского целлюлозно-бумажного комбината в дополнение к отходам IV и V классов опасности, утилизировавшимся на золошламоотвале предприятия, на территорию, отраженную на карте № 14, сливали высокотоксичный зеленый щелок, а, поскольку на этом участке в наибольшей степени распространены слабопроницаемые породы, состав подземных вод стабилизировался и его восстановление происходит крайне медленно. Для ликвидации накопленного экологического вреда и предотвращения дальнейшего загрязнения подземных вод необходимо восстановить режимные наблюдения за изменением химического состава подземных вод, интенсифицировать начатую многоступенчатую очистку надшламовых вод с последующей рекультивацией территории, предусматривающей использование водоупорных материалов для покрытия дна и бортов золошламоотвалов, создание противопаводковых и противоселевых сооружений.

Ключевые слова: Байкал, Бабхинский полигон шламонакопителей, карты, подземные воды, загрязнение, Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат, содержание загрязняющих веществ

Для цитирования: Аузина Л.И. Оценка воздействия Бабхинского полигона шламонакопителей на подземные воды прибрежной зоны озера Байкал // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 4. С. 441–456. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-4-441-456>. EDN: AVXHJX.

Original article

Evaluation of Babkhinsky sludge landfill impact on groundwater in Lake Baikal coastal zone

Larisa I. Auzina^{a✉}

^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The main purpose of the work was to analyze the current state of pollutant distribution in the area of the Babkhinsky sludge storage landfill of the Baikal Pulp and Paper Mill. To solve the set problem the long-term data reflecting the chemical composition of natural and above-sludge waters during various periods of plant operation and after its closure were analyzed, followed by modeling and evaluation of the geological, structural and hydrogeological conditions of the area, technological features of engineering structures and wastewater composition, which together influenced the nature and extent of pollutants in the coastal area of Lake Baikal. As a result of the conducted analysis, it was concluded that the highest concentrations are demonstrated by the following indicators: lead, iron, arsenic, increased turbidity and color of water. The maximum pollution is concentrated within the area of map No. 14, as well as on the border area between the areas of maps No. 14 and 13 located approximately 1.5 km from the water's edge of Lake Baikal. This situation is due to the fact that during the closure of the Baikal Pulp and Paper Mill, in addition to Class IV and V hazard waste disposed of in the plant's ash disposal site, highly toxic green liquor was discharged into the area shown on map no. 14. Since this area is dominated by low-permeability rocks, the groundwater composition stabilized and its recovery is extremely slow.

© Аузина Л.И., 2025



To eliminate accumulated environmental damage and prevent further groundwater pollution, it is necessary to restore routine monitoring of changes in the chemical composition of groundwater, intensify the ongoing multi-stage treatment of above-sludge waters, and subsequently reclaim the area, including the use of impermeable materials to line the bottom and sides of ash and sludge disposal sites and the construction of flood and mudflow control structures.

Keywords: Baikal, Babkhinsky sludge storage landfill, maps, groundwater, pollution, Baikal Pulp and Paper Mill, pollutant content

For citation: Auzina L.I. Evaluation of Babkhinsky sludge landfill impact on groundwater in Lake Baikal coastal zone. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(4):441-456. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-4-441-456>. EDN: ABXHJX.

Введение

Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК) – промышленное предприятие, расположенное в городе Байкальске Слюдянского района Иркутской области, на юге восточного берега озера Байкал (Россия). Предприятие получило широкую известность как крупнейший источник загрязнения Байкала. Комбинат был введен в эксплуатацию осенью 1966 года. Шламонакопители строились в 60–70-е годы XX века как временные площадки хранения отходов комбината [1]. Карты-шламонакопители находятся на трех полигонах отходов – Солзанском, Бабхинском и на полигоне, расположенном на промплощадке БЦБК (рис. 1)¹. Всего от работы БЦБК осталось 14 шламонакопителей. Это огромные искусственные гидрорезервуары площадью 180 га и объемом более 6,5 млн м³. На Бабхинский полигон помимо золошлаков от сжигания углей сбрасывались шлам-лигнин, коросодержащие отходы, твердые бытовые и строительные отходы, золы от сжигания угля, шлам-лигнина, шлам зеленого щелока, твердые коммунальные отходы. Золошламоотвалы БЦБК помимо воздействия на подземные воды в результате пыления оказывали вредное воздействие на атмосферный воздух, почвенный покров, растительность прилегающих участков.

В 2013 году правительством Российской Федерации было принято решение о закрытии ОАО «БЦБК». С 14 сентября 2013 года основная производственная деятельность по выпуску сульфатной вискозной целлюлозы прекращена.

Несмотря на длительный период, прошедший с момента прекращения работы БЦБК и

использования шламонакопителей в производственных целях, загрязнение подземных вод продолжается и в настоящее время, что обусловлено рядом причин.

Большой вклад в данный процесс вносит гидравлическая взаимосвязь надшламовых и подземных вод, разгружающихся в озеро Байкал. Тонны осадков-загрязнителей в чашах карт дополнительно «обогащают» надшламовые воды.

Кроме того, карты постоянно наполняются тальмами и дождевыми водами, что приводит к их переполнению и возникновению угрозы попадания загрязняющих веществ в озеро Байкал. За полвека работы БЦБК в картах накопились не только миллионы тонн твердых и жидких отходов, но и 1,5 млн т надшламовых вод, которые могут перелиться через борта карт², из-за чего 13 апреля 2021 года в Байкальске уже был введен режим чрезвычайной ситуации. Для устранения угрозы утечек отходов производится откачка надшламовых вод стоком техногенных подземных вод в Байкал.

Дополнительные риски связаны с тем, что территория размещения шламонакопителей находится под постоянной селевой угрозой. Примеры тому приводит заведующий лабораторией инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия) Артем Рыбченко: в 1971 году одна из карт-накопителей уже была заполнена селевыми отложениями, в 2019 году селевый поток едва не вынес отходы БЦБК в озеро, в июне 2022 года в Слюдянском районе Иркутской области несколько раз из-за схода селей перекрывали движение на федеральной автотрассе³.

¹ О проблеме ликвидации накопленных отходов в результате деятельности ОАО «Байкальский ЦБК» // Geol.irk.ru. Режим доступа: http://www.geol.irk.ru/baikal/baikal/baikal_law_fulfillment/mvk/050609/reports/report_Othody.pdf (дата обращения 26.02.2025).

² Емельяненко А. Байкал пытаются защитить от прорыва надшламовых вод из карт-накопителей ЦБК // Rg.ru. Режим доступа: <https://rg.ru/2021/05/31/reg-dfo/bajkal-pytaiutsia-zashchitit-ot-proryva-nadshlamovyh-vod-iz-kart-nakopitelej-cbk.html> (дата обращения 26.02.2025).

³ Ученый рассказал, как оползни и сели могут повлиять на отходы в шламонакопителях БЦБК // Irkutskmedia.ru. Режим доступа: <https://irkutskmedia.ru/news/1308856/> (дата обращения 26.02.2025).

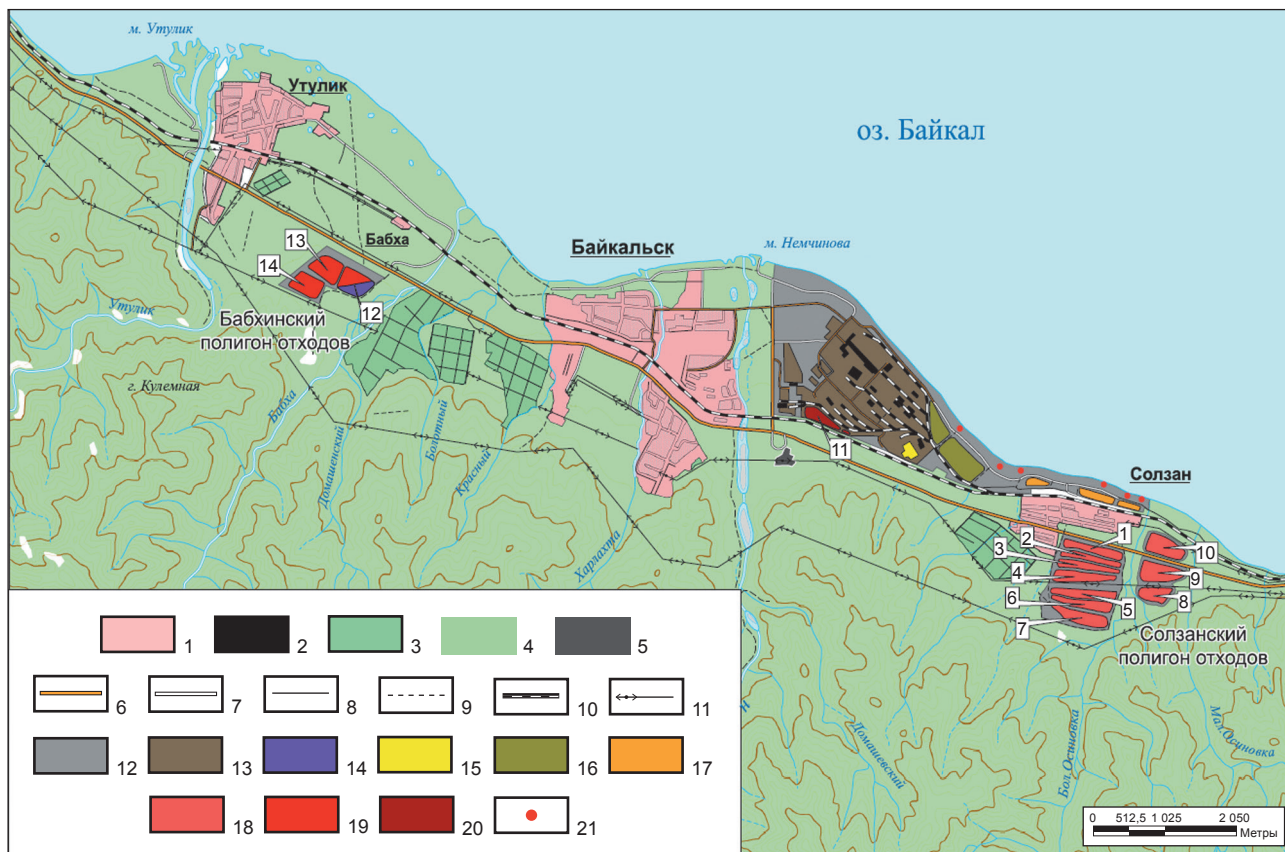


Рис. 1. Ситуационный план¹:

1 – населенные пункты; 2 – отдельные строения; 3 – дачные и садовые участки; 4 – растительность; 5 – кладбища; 6–11 – дороги: 6 – шоссе, 7 – улучшенные грунтовые дороги, 8 – грунтовые проселочные дороги, 9 – полевые и лесные дороги, 10 – железные дороги, 11 – линии электропередач; 12 – землеотвод ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат»; 13 – промплощадка комбината; 14 – полигон твердых бытовых отходов (карта № 12); 15 – очистные сооружения; 16 – рекультивационный золоотвал; 17 – пруд-отстойник; 18 – Солзанский полигон отходов (карты № 1–10); 19 – Бабхинский полигон отходов (карты № 12–14); 20 – карта № 11; 21 – захоронение древесных отходов

Fig. 1. Situational plan¹:

1 – settlements; 2 – individual buildings; 3 – summer cottages and garden plots; 4 – vegetation; 5 – cemeteries; 6–11 – roads: 6 – highways, 7 – improved unpaved roads, 8 – unpaved country roads, 9 – field and forest roads, 10 – railways, 11 – power lines; 12 – land drainage of JSC Baikalsky Pulp and Paper Mill; 13 – industrial site of the plant; 14 – landfill of solid household waste (map No. 12); 15 – sewage treatment plants; 16 – reclamation ash dump; 17 – settling pond; 18 – Solzansky waste landfill (maps No. 1–10); 19 – Babkhinsky waste landfill (maps No. 12–14); 20 – map No. 11; 21 – wood waste disposal

В настоящее время на площадке БЦБК и прилегающих территориях планируется создание высокотехнологического туристического кластера. В рамках этого проекта демонтируются производственные конструкции комбината: 17 объектов были снесены в 2025 году, в 2026 году начнется демонтаж еще 150 объектов.

Кроме того, планируется, что в 2026 году начнут откачку и очистку щелочесодержащих стоков и надшламовых вод до природоохранных нормативов Центральной экологической

зоны Байкальской природной территории. Полный комплекс работ планируют завершить в 2027 году⁴. На Бабхинском полигоне предполагается очистка 400 тыс. м³ надшламовых вод⁴.

Материалы и методы исследования

Основная цель проведенной работы заключалась в оценке воздействия Бабхинского золошламоотвала на подземные воды, определении наличия, степени и источников загряз-

⁴ Началась подготовка к запуску очистного оборудования на площадке бывшего БЦБК для устранения накопленного экологического вреда // Energybase.ru. Режим доступа: <https://energybase.ru/news/companies/rosatom-predstavil-vice-premeru-rf-dmitriu-patrusevu-hod-rabot-po-likvidac-2025-08-28> (дата обращения 13.10.2025).



нения подземных вод. Для ее достижения был проведен анализ многолетних наблюдений за состоянием природных и надшламмовых вод в районе шламоотвала, результатов опробования и лабораторных анализов подземных и поверхностных вод, изложенных в работах^{1,5} [2], а также осуществлено комплексное обследование территории, моделирование распространения загрязняющих компонентов.

В целом комбинат за 40 лет накопил огромное количество отходов, которые складированы на полигонах, находящихся в непосредственной близости от Байкала (см. рис. 1). Основной по объему загрязнитель – это шлам-лигнин. Шламонакопители и золоотстойники БЦБК занимают площадь 350 га, из

них непосредственно карты – 123 га. В них накоплено 6,2 млн м³ шлам-лигнина (карты № 1–7, 9, 10) и 2,6 млн т золы (карты № 11–14)⁶. Бабхинский полигон расположен к западу от БЦБК между реками Бабха и Утулик, в 1,35–2 км от озера Байкал. Он состоит из четырех карт: 11, 12, 13, 14, в которых сосредоточено 2,6 млн т золы [3].

В гидрогеологическом отношении изучаемая территория приурочена к Байкальской складчатой области, которая характеризуется преимущественным развитием подземных вод в трещиноватых породах архейского возраста и порово-пластовых вод в рыхлых неоген-четвертичных отложениях (рис. 2, 3). Наибольший интерес представляет последний,

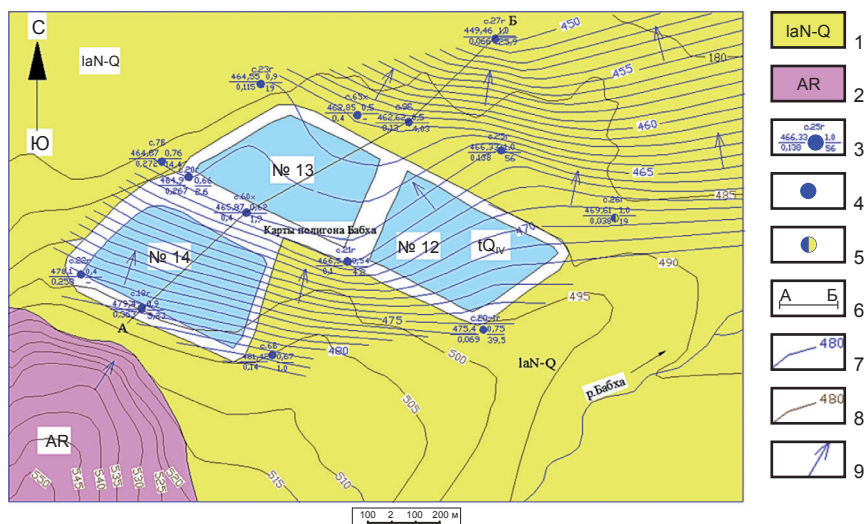


Рис. 2. Схематическая гидрогеологическая карта района Бабхинского полигона (составлено автором по материалам Ангарской геологической экспедиции ФГУНПП «Иркутскгеофизика»):

1, 2 – распространенные по площади водоносные подразделения: 1 – водоносный горизонт озерно-аллювиальных неоген-четвертичных отложений, 2 – архейская водоносная зона трещиноватости;
3 – скважина гидрогеологическая (октябрь – ноябрь 2021 года; вверху – номер скважины; цифры слева в числителе – абсолютные отметки уровня грунтовых вод, м, в знаменателе – минерализация, г/л, справа в числителе – дебит, л/с, в знаменателе – коэффициент фильтрации, м/сут.); 4, 5 – химический состав подземных вод: 4 – вода с преобладанием гидрокарбонатного иона, 5 – вода с преобладанием гидрокарбонатного и сульфидного ионов; 6 – линия гидрогеологического разреза; 7 – гидроизогипсы (октябрь – ноябрь 2021 года); 8 – горизонталы рельефа (2021 год); 9 – направление движения потока подземных вод

Fig. 2. Schematic hydrogeological map of the Babkhinsky landfill (made by the author based on the materials of the Angarsk geological expedition of the Irkutsk Geophysics Research Institute):

1, 2 – aquifers widespread in the area: 1 – aquifer of lacustrine-alluvial Neogene-Quaternary deposits, 2 – Archean aquifer fracturing zone; 3 – hydrogeological well (October – November 2021; at the top – well number; numbers on the left: numerator – absolute groundwater level, m, denominator – mineralization, g/l, on the right in the numerator – flow rate, l/s, denominator – filtration coefficient, m/day.); 4, 5 – groundwater chemical composition: 4 – water with bicarbonate ion predominance, 5 – water with the predominance of bicarbonate and sulfide ions; 6 – hydrogeological section line; 7 – waterproofing gypsums (October – November 2021); 8 – relief contours (2021); 9 – direction of groundwater flow movement

⁵ Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2011 году». Иркутск: Изд-во Сибирского филиала ФГУНПП «Росгеолфонд», 2012. 412 с.

⁶ Дамбинов Ю.А. Изучение состава шлам-лигнина БЦБК для разработки методов ремедиации полигонов промотходов // Conf.nsc.ru. Режим доступа: <http://conf.nsc.ru/youngconf-2013/ru/reportview/151272> (дата обращения 26.02.2025).

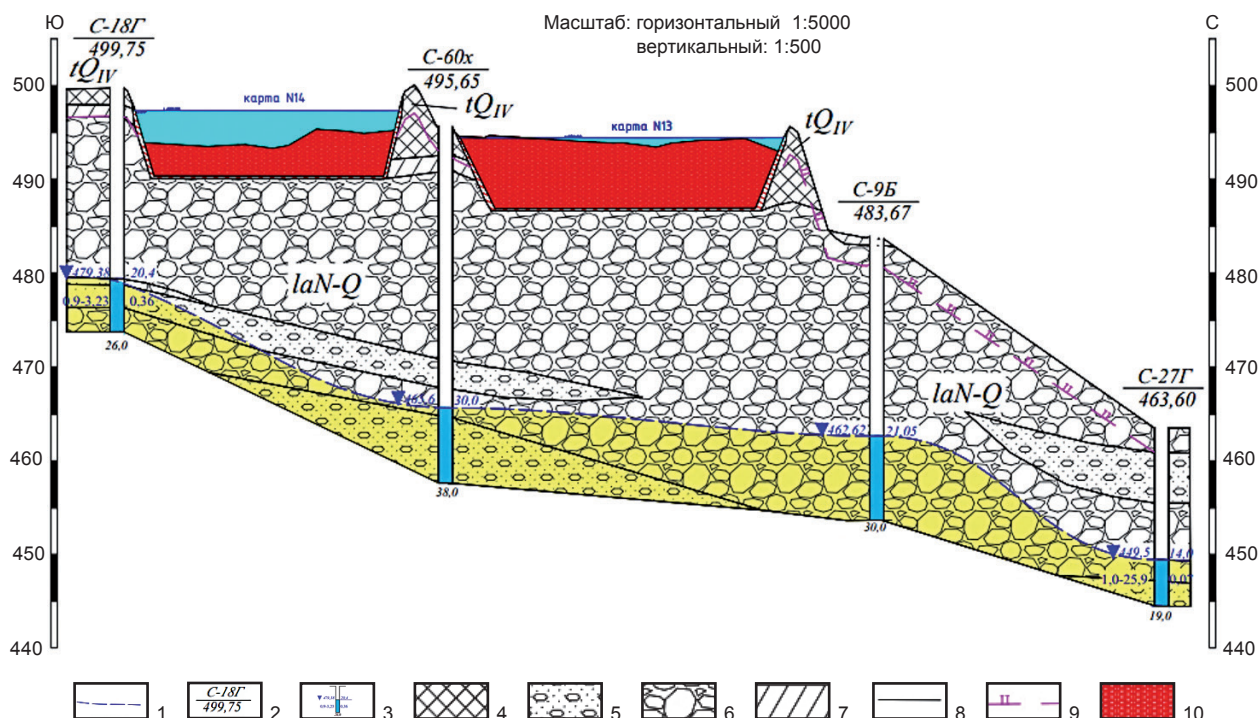


Рис. 3. Гидрогеологический разрез территории Бабхинского полигона по линии А-Б:

1 – пьезометрический уровень подземных вод; 2 – скважина гидрогеологическая (вверху в числителе – номер по первоисточнику, в знаменателе – абсолютная отметка устья, м); 3 – обозначение параметров скважин (цифры вверху слева – абсолютная отметка уровня подземных вод, м, справа – глубина уровня подземных вод, м, цвет указывает на анионный состав подземных вод; цифры в середине слева – дебит откачки, л/с, справа – минерализация, г/дм³; цифры снизу – глубина скважины, м); 4 – насыпные грунты: галечниковый, валунно-галечниковый грунт с песчаным заполнителем; 5 – галечниковый грунт с песчаным заполнителем; 6 – валунно-галечниковый грунт с песчаным заполнителем; 7 – суглинок; 8 – граница между различными генетическими типами пород; 9 – граница сезонного промерзания пород; 10 – техногенные (намывные) грунты в картах-накопителях

Fig. 3. Hydrogeological section of the territory of the Babkhinsky landfill along the A-B line:

1 – piezometric groundwater level; 2 – hydrogeological well (numerator at the top – source number, denominator – absolute wellhead elevation, m); 3 – designation of well parameters (numbers at top left – absolute groundwater level elevation, m; on the right – groundwater level depth, m; color indicates groundwater anionic composition; numbers in the middle on the left – pumping flow rate, l/s; on the right – mineralization, g/dm³; numbers at bottom – well depth, m); 4 – fill soils: pebble, boulder-pebble soil with sandy aggregate; 5 – pebble soil with sandy aggregate; 6 – boulder-pebble soil with sandy aggregate; 7 – loam; 8 – boundary between different genetic types of rocks; 9 – boundary of seasonal freezing of rocks; 10 – technogenic (alluvial) soils in storage maps

поскольку именно порово-пластовые воды подвергаются наиболее интенсивному загрязнению.

Водоносный горизонт озерно-аллювиальных неоген-четвертичных отложений (laN-Q) сформировался в кайнозойской аккумулятивной впадине, протягивающейся на ширину в несколько километров вдоль береговой линии озера Байкал. Он приурочен к поймам рек Солзан, Бабха, Большая Осиновка и Харлахта. Водовмещающие породы представлены валунно-гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем, вскрытая мощность составляет более 30 м (см. рис. 3). Глубина формирования уровня грунтовых вод

в основном изменяется от 1 до 3 м, достигая на отдельных участках 22,5 м от поверхности земли. Из-за крайне неоднородного состава водовмещающих отложений фильтрационные параметры изменяются весьма значительно, коэффициент фильтрации варьируется от 2,6 до 39,5 м/сут. (рис. 4).

Питание комплекса происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод. Подземные воды горизонта не защищены от загрязнения, при этом они являются одним из основных источников водоснабжения города Байкальска.

Структура загрязнения вполне понятна и универсальна [4, 5]: метеорные и техноген-

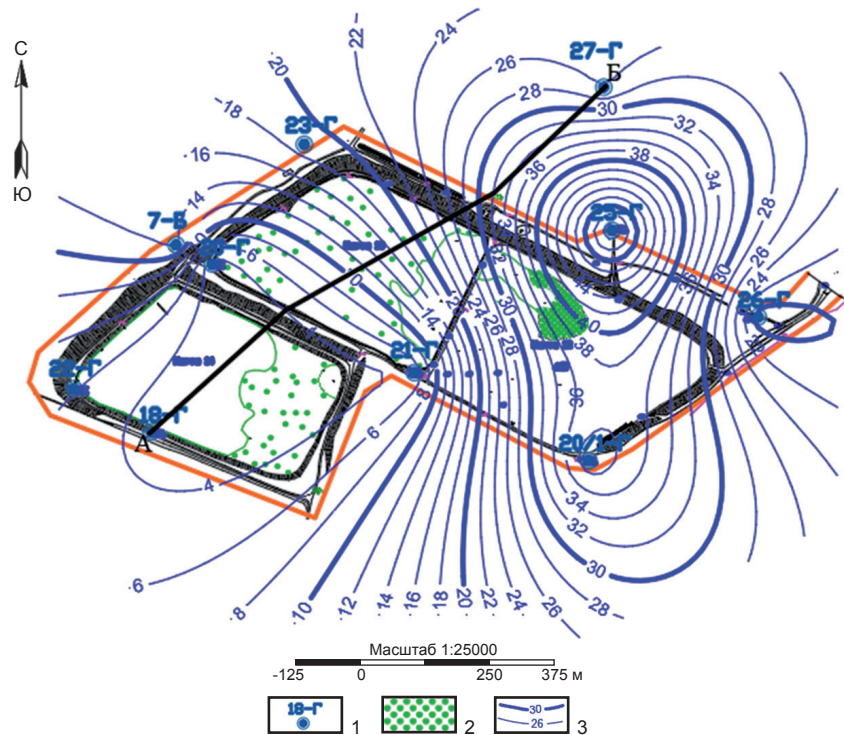


Рис. 4. Схема распределения коэффициентов фильтрации неоген-четвертичных отложений на территории Бабхинского полигона (2022 год):

- 1 – скважина гидрогеологическая (вверху – номер по первоисточнику); 2 – растительность;
3 – изолинии значений коэффициента фильтрации, м/сут.

Fig. 4. Distribution diagram of filtration coefficients of Neogene-Quaternary sediments on the territory of the Babkhinsky landfill (2022):

- 1 – hydrogeological well (number according to the original source at the top); 2 – vegetation;
3 – isolines of filtration coefficient values, m/day

ные воды, попадающие в шламохранилище, взаимодействуют с накопленным шламом, далее в процессе инфильтрации сформировавшиеся растворы взаимодействуют с грунтовыми водами в зоне, расположенной под шламохранилищами [6, 7], и мигрируют в соответствии с общим направлением потока, в данном случае – в сторону озера Байкал, разгружаясь там в виде субкавальных родников, что подтверждают наблюдения, проводимые с 2013 года. Начиная с этого времени на западном побережье озера фиксируется зона, загрязненная черным слизистым осадком. Результаты спектроскопии черных отложений на камнях были сопоставлены со спектрами отходов производства целлюлозы в виде свежего шлам-лигнина и сухого остатка сточных вод комбината и показали их идентичность, что обусловлено, вероятно, высачиванием техногенных подземных вод БЦБК. Кроме того, наблюдения 2013–2015 годов

выявили обогащение интерстициальных вод сульфатами (до 28 мг/дм³), натрием (до 14 мг/дм³), ионами хлора (до 3,5 мг/дм³) и соединениями азота⁷. Представленные сведения являются доказательством попадания неочищенных техногенных вод БЦБК (через грунтовые воды) в мелководную зону озера. Очевидно, что верхний участок пляжа и прибрежной зоны являлся зоной их разгрузки. В июне 2023 года проведено очередное исследование пляжа и прибрежной акватории озера напротив площадки БЦБК⁷. Полученные данные по гидрохимии указывают, что и через 10 лет после закрытия комбината загрязнение интерстициальных и прибрежных вод озера в данном районе продолжается. Концентрации загрязняющих компонентов, полученные в 2023 году в интерстициальной воде, сопоставимы с полученными в 2013–2015 годах⁷. Состав воды, отобранной в придонном слое озера на глубине 1 м, позволяет

⁷ Томберг И.В., Тимошкин О.А. Поступление загрязняющих веществ с промплощадки БЦБК с подземным стоком в прибрежную воду озера Байкал // Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2023 году». М.: Изд-во ФГБУ «ВНИИ Экология», 2024. С. 312–316.



предположить, что разгрузка грунтовых вод, обогащенных сульфатами, хлором, натрием, фосфатами и органикой, продолжается и происходит непосредственно в озеро. А двукратное увеличение концентраций загрязняющих компонентов в прибрежной воде озера (урез) по сравнению с периодом 2013–2015 годов, возможно, указывает на увеличение объемов поступления грунтовых вод.

В пределах карт в подземных водах отмечается большой спектр загрязнителей, среди которых наиболее широко распространены мышьяк, марганец, свинец, железо, ртуть, фиксируется повышенная мутность воды.

Уровень загрязнения окружающей среды за период работы БЦБК отражен во многих документах, в том числе в докладах «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране» разных лет^{8,9} [8]. В табл. 1 представле-

на динамика изменения содержания загрязняющих компонентов в природных водах на Бабхинском полигоне за период 2011–2017 годов.

В 2018 году в лаборатории изотопии и геохронологии Института земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия) методом масс-спектрометрии были проанализированы пробы надшламовых вод из нескольких карт-накопителей, в том числе карты № 14¹⁰. Были зафиксированы повышенные содержания алюминия, серы (SO₄²⁻), железа, меди, стронция, молибдена, а также ванадия, галлия, хрома, таллия, обычно содержащиеся в горнопромышленных отходах и представляющие значительную экологическую опасность¹¹.

Таким образом, судя по литературным данным, наибольшие опасения за период 2012–2018 годов вызывали следующие ком-

Таблица 1. Динамика изменения содержания загрязняющих компонентов в природных водах на Бабхинском полигоне

Table 1. Dynamics of changes in pollutant content in natural waters at the Babkhinsky landfill

Год	Загрязняющий компонент	Содержание	Примечание
2011	Химическое потребление кислорода	12–16 ПДК	–
	Перманганатная окисляемость	–	–
2012	Сухой остаток	1–5 ПДК	Участок перехватывающего водозабора
	Формальдегид	1,2 ПДК	–
	Фосфаты	до 4,6 ПДК	–
	Нефтепродукты	до 7 ПДК	–
	Алюминий	7–16 ПДК	–
	Сероводород	до 24 ПДК	–
	Железо	до 43 мг/л	–
	Лигнин	до 49 мг/л	–
	Химическое потребление кислорода	до 88 мг/л	–
	Перманганатная окисляемость	до 122 мг/л	–
	Цветность	до 156 град.	–
Температура	до 55 °С	Фоновая 4 °С	
2013	Химическое потребление кислорода	1,6 мг/л	–
	Железо	до 20 мг/л	–
2014	Химическое потребление кислорода	1,4 мг/л	–
	Нефтепродукты	1,4 мг/л	–
2017	Железо	до 33 мг/л	–
	Железо	14,17 мг/л	–
2017	Марганец	2,74 мг/л	–

⁸ Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2012 году». Иркутск: Изд-во Сибирского филиала ФГУНПП «Росгеолфонд», 2013. 436 с.

⁹ Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году». Иркутск: Изд-во АНО «КЦ Эксперт», 2018. 340 с.

¹⁰ Петров И.В. Вторичные ресурсы, образующиеся в горнодобывающей промышленности. М.: Изд-во Финансового университета при Правительстве РФ, 2020. 35 с.

¹¹ Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2015 году». Иркутск: Изд-во ИНЦХТ, 2016. 372 с.



поненты-загрязнители воды: железо, алюминий, цветность, кроме того, до 2014 года (до закрытия комбината) – химическое потребление кислорода, галогенсодержащие органические соединения, отмеченные в осадках карт и надшламовой воде, но не зафиксированные в подземных водах, а также цветные металлы и их соединения^{10,11} [9].

В 2021 году в рамках совместных работ, направленных на оценку воздействия золошламоотвала «Бабха» на подземные воды, на территории Бабхинского полигона ООО «Геоинжиниринг» пробурены 13 гидрогеологических скважин, из которых в процессе откачек отобраны и проанализированы пробы воды из водоносного комплекса неоген-четвертичных отложений. Определены 40 показателей, содержание 21 из них в различной степени превысило предельно допустимые концентрации (ПДК), включая мышьяк, свинец, железо, мутность, цветность, литий, марганец, ртуть, сурьму, алюминий, анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ), фенол, точно фиксировалось превышение ряда других компонентов (нефтепродукты, химическое потребление кислорода, бор, барий).

По результатам анализа данных среди химических компонентов в настоящее время наибольшими загрязнителями являются мышьяк, свинец, железо, повышенная мутность воды, в меньшей степени цветность

воды, АПАВ, марганец, литий, сурьма, ртуть, что в основном подтверждает результаты, полученные учеными Института земной коры СО РАН в 2018 году при анализе надшламовых вод из карты № 14¹². Максимальный уровень загрязнения зафиксирован по скважинам 7-Г, 18-Г, несколько менее загрязнены воды в скважинах 20-Г, 22-Г, 23-Г (рис. 5–7). Таким образом, в наибольшей степени загрязнены подземные воды в пределах карты № 14 (табл. 2).

Последующая оценка распространения загрязняющих компонентов на исследуемом участке была произведена методом моделирования с использованием программных комплексов Golden Software Surfer 16.6 и Visual Modflow Premium. В результате были составлены схемы распределения содержания загрязняющих химических элементов, наиболее значимые из которых отражены на рис. 5–7. На рис. 7 представлено распределение интегрального индекса загрязнения, в различных вариациях использующегося в работах исследователей [11–13], а в данном случае рассчитанного по авторской методике, базирующейся на методе экспертных оценок [9, 14] и учитывающей вклад 15 компонентов (цветность, мутность, алюминий, АПАВ, железо, литий, марганец, медь, молибден, мышьяк, нефтепродукты, ртуть, свинец, сурьма, фенолы).

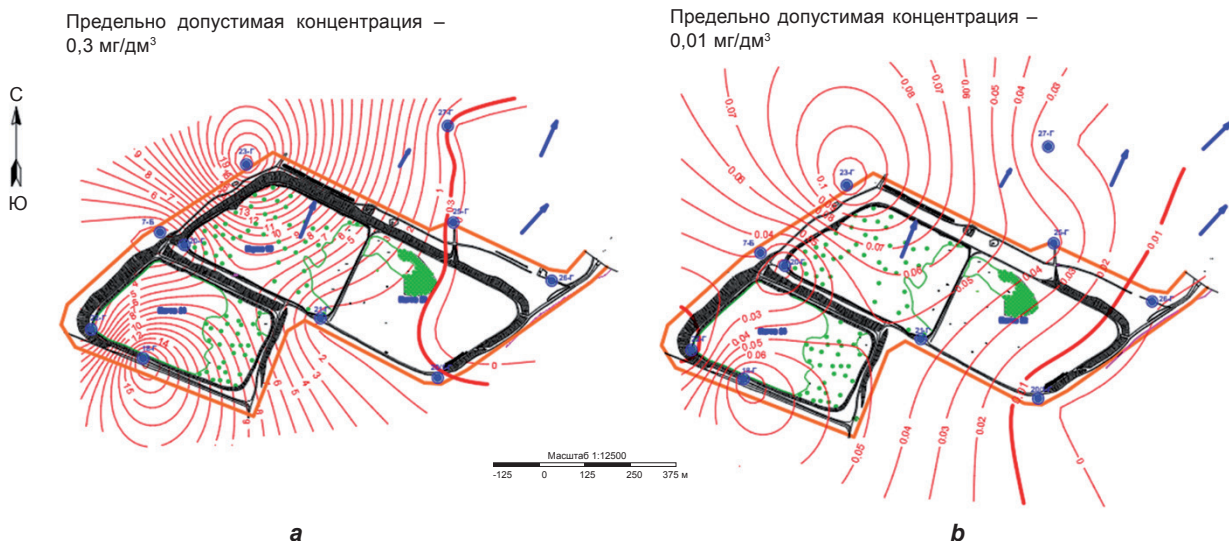


Рис. 5. Схемы распределения содержания железа (a) и свинца (b) в подземных водах на территории Бабхинского полигона, мг/дм³
Fig. 5. Distribution diagrams of iron (a) and lead (b) contents in groundwater within the Babkhinsky landfill, mg/dm³

¹² Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области за 2012 год». Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2013. 337 с.



Предельно допустимая концентрация – 2,6 ЕМФ

Предельно допустимая концентрация – 20 град.

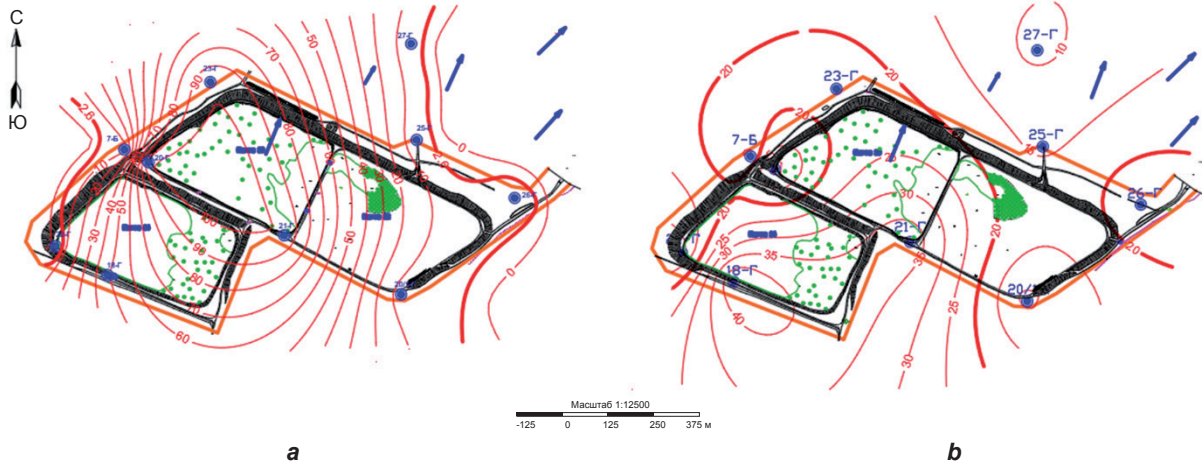


Рис. 6. Схемы распределения показателей мутности (а) и цветности (b) в подземных водах на территории Бабхинского полигона, мг/дм³
Fig. 6. Distribution diagrams of turbidity (a) and color (b) in groundwater within the Babkhinsky landfill, mg/dm³

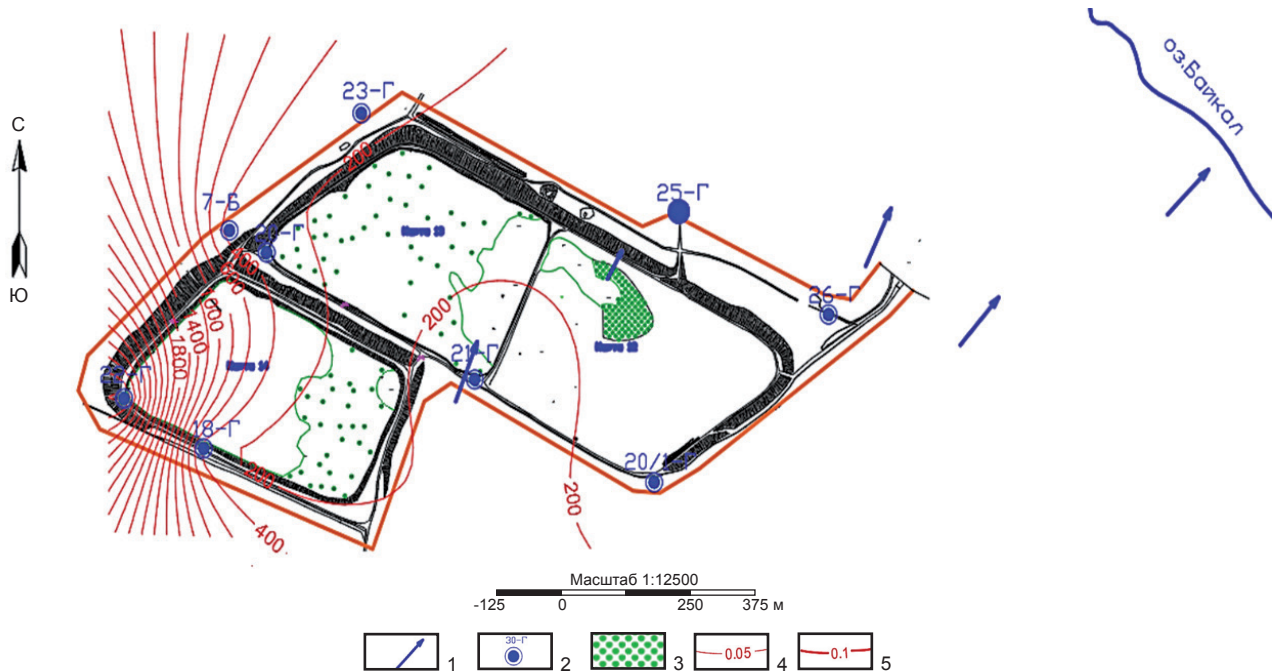


Рис. 7. Схема распределения суммарного индекса загрязнения подземных вод на территории Бабхинского полигона [10]:

- 1 – направление движения подземных вод; 2 – скважина гидрогеологическая (вверху – номер по первоисточнику);
- 3 – растительность; 4 – изолинии содержания загрязняющего компонента в подземных водах, мг/дм³;
- 5 – изолиния содержания, соответствующая предельно допустимой концентрации загрязнителя

Fig. 7. Distribution diagram of the total groundwater pollution index in the territory of the Babkhinsky landfill [10]:

- 1 – groundwater movement direction; 2 – hydrogeological well (number according to the original source at the top);
- 3 – vegetation; 4 – isolines of the pollutant component content in groundwater, mg/dm³;
- 5 – isoline of the content corresponding to the maximum permissible pollutant concentration

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты анализа исходной информации и проведенного моделирования сви-

детельствуют о том, что наиболее высокие концентрации имеют следующие показатели: мышьяк, свинец, железо, повышенная мутность воды (табл. 3). В меньшей степени:



Таблица 2. Распределение загрязняющих компонентов по скважинам и картам
Table 2. Distribution of polluting components by wells and maps

Номер карты	Номер скважины	Дополнение к расположению скважин	Загрязняющий компонент
12	20/1-Г	Южная окраина	Li, Pb, Fe, мутность, цветность
13	20-Г	Западная окраина	Анионные поверхностно-активные вещества, Fe, As, Mn, Li, мутность
14	18-Г	Юго-западная окраина	Анионные поверхностно-активные вещества, фенолы, As, Mn, Pb, Fe, Hg, мутность, цветность
	22-Г		Li, Al, Fe, Pb, мутность, цветность
Между картами 13 и 14	7-Б	Западная окраина	Химическое потребление кислорода, нефтепродукты, фенолы, анионные поверхностно-активные вещества, Li, Mn, Hg, Al, As, Fe, B
Между картами 12 и 13	21		Li, Pb, Fe, мутность, цветность
На северо-западе от карты 13	23	За пределами территории шламохранилища	B, Al, Fe, Pb, Mn, мутность, цветность
На северо-западе от карты 12	25	За пределами территории шламохранилища	Sr, Pb, As, мутность
	26		As, Sr, мутность, цветность (незначительно)
–	27	За пределами территории шламохранилища в северо-восточном направлении	As, Sr, Pb, мутность (незначительно)
–	28	За пределами территории шламохранилища в северо-восточном направлении	Анионные поверхностно-активные вещества, Hg, бенз(а)пирен, мутность, цветность
–	29	За пределами территории шламохранилища в северо-восточном направлении	Hg, бенз(а)пирен
–	30	По трассе	As, Pb, Sr, мутность (незначительно)

цветность воды, марганец, литий, сурьма.

Максимальное загрязнение сосредоточено в пределах территории карты № 14: скважины 18-Г, 22-Г, а также на приграничной площади между картами № 14 и 13: скважины 7-Б, 20-Г, 21-Г, в значительно меньшей степени – на территории карт № 12 и 13 (см. рис. 7).

В юго-западной части карты № 14 суммарный индекс загрязнения почти в два раза превышает загрязнение в прибрежной части города Байкальска (см. рис. 7). В пределах этой территории в наибольшей степени в разрезе неоген-четвертичных отложений распространены суглинистые прослои, характеризующиеся пониженными фильтрационными параметрами (см. рис. 4), что препятствует свободному потоку подземных вод, направленному в сторону озера Байкал (основное направление потока подземных вод – с юго-запада на северо-восток (см. рис. 2)), и способствует застойным явлениям в водонасыщенных грунтах в южной и юго-западной частях и большей промытости пород на севере и северо-востоке территории (карты № 13 и 12).

Максимальное загрязнение подземных вод, фиксирующееся на площади карты № 14,

тем более закономерно, что при закрытии БЦБК в дополнение к отходам IV и V классов опасности (золошлаки от сжигания углей, зола от сжигания осадков сточных вод, отходы коры, зола корьевых котлов, отходы целлюлозного волокна), утилизировавшимся на золошламоотвале предприятия, на территорию карты № 14 сливали высокотоксичный зеленый щелок, а, поскольку здесь в наибольшей степени распространены слабопроницаемые породы, состав подземных вод стабилизировался и его восстановление в настоящее время происходит крайне медленно. Также в слитом щелоке содержалось мелкое целлюлозное волокно [15], чем обусловлена повышенная мутность и цветность подземных вод. Этому же процессу на всей территории полигона способствовало то, что на ОАО «БЦБК» при прохождении химической очистки с применением глинозема и полиакриламида растворенные и коллоидные соединения шлам-лигнина, присутствующие в сточной воде, сгущались до состояния осадка 0,5 %-й концентрации⁵.

Следует отметить, что пробы воды отбирались в меженный период (октябрь – ноябрь 2021 года), в паводки показатели мутности и



Таблица 3. Показатели, превышающие предельно допустимые концентрации
Table 3. Indicators exceeding maximum permissible concentrations

Показатель	Предельно допустимая концентрация	Номер скважины												
		7-Б	22-Г	18-Г	20/1-Г	21-Г	20-Г	23-Г	25-Г	27-Г	26-Г	30-Г	28-Г	29-Г
Содержание показателей, превышающее предельно допустимую концентрацию														
Сухой остаток, мг/л	–	272	258	363	69	101	267	115	138	66	38	115	74	82
Химическое потребление кислорода, мг/л	34,0	–	260	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Нефтепродукты, мг/л	0,1	–	0,43	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Фенол, гидроксibenзол, мг/л	0,001	–	0,0042	0,0021	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Анионные поверхностно-активные вещества, мг/л	0,05	–	0,19	0,054	–	–	0,066	–	–	–	–	–	0,07	–
Алюминий, мг/л	0,5	0,63	2,3	–	–	–	–	1,3	–	–	–	–	–	–
Мышьяк, мг/л	0,01	–	0,015	0,026	–	–	0,035	–	0,41	0,29	0,16	0,35	–	–
Бор, мг/л	0,5	–	–	–	–	–	–	3,6	–	–	–	–	–	–
Кадмий, мг/л	0,001	0,0016	–	–	–	–	–	–	0,0036	0,0013	0,0014	–	–	–
Литий, мг/л	0,03	0,76	0,76	–	0,083	0,76	0,9	–	–	–	–	–	–	–
Марганец, мг/л	0,1	–	0,21	0,18	–	–	0,25	0,26	–	–	–	–	–	–
Свинец, мг/л	0,01	0,033	–	0,09	–	0,046	–	0,12	0,044	0,021	–	0,032	–	–
Сурьма, мг/л	0,005	–	–	–	–	–	–	–	0,14	0,31	0,157	0,38	–	–
Железо, мг/л	0,3	1,2	2,2	19	0,2	0,34	2,2	23	–	–	–	–	–	–
Барий, мг/л	0,7	–	1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ртуть, мг/л	0,5	–	1,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51	0,52
Бенз(а)пирен, мг/л	0,00001	Менее 0,05											1,4	0,68
Мутность (по формазину и коалину), ЕМФ	2,6 ЕМФ (1,5)	3,5	–	49	4,9	99	Более 100	Более 100	3,3	3,3	3,6	3,3	9,1	–
Цветность, град.	20(35)	26	–	45	–	39	–	23	–	–	24	–	31,6	–

цветности подземных вод, вероятнее всего, будут выше.

В ряде работ¹³ [14, 16] отмечались высокие значения водородного показателя pH в надшламовой воде золошламоотвалов – более 12. Это обусловлено наличием щелочи, источником которой являлся шлам зеленого щелока. В настоящее время этот показатель в подземных водах отражает практически нейтральную реакцию среды, составляя 6,1–7,2.

Повышенное содержание таких компонентов, как марганец, мышьяк, свинец, литий, сурьма, обосновано их присутствием в картах, заполненных золой, лигнином, твердыми и другими отходами IV и V классов опасности¹⁴.

Повышенное содержание мышьяка (см. табл. 3, рис. 5) имеет практически площадной характер, максимальные концентрации соответствуют северо-восточной части исследуемой территории. Это один из наи-

¹³ Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (вместе с «СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные правила и нормы...»): Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 (ред. от 30.12.2022). 1029 с.

¹⁴ Информационный бюллетень о состоянии недр территории Сибирского федерального округа в 2020 г. Вып. 17. Кн. 1. Томск: Изд-во Филиала «СРЦ ГМСН» ФГБУ «Гидроспецгеология», 2021. 196 с.



более токсичных компонентов, входящих в состав шлам-лигнина, складированного в картах^{15,16} [15] и в соответствии с направлением движения потока подземных вод выносимого в сторону скважины 25-Г, в которой и зафиксирована его максимальная концентрация.

Значительное содержание железа (см. рис. 7), характерное для большей части исследуемой площади, а также алюминия, уровень которого превышает ПДК (см. табл. 3), обусловлено их высокой концентрацией в основном складированном отходе – зольной пульпе и золе теплоэлектроцентрали БЦБК [16], а также содержанием в шлам-лигнине и надшламовой воде⁵.

С запада и юго-запада к территории карты № 14 (скважины 22-Г, 7-Б) поступают нефтепродукты, фенолы, АПАВ, свинец, что связано, вероятнее всего, не только с тем, что эти компоненты входят в состав шлам-лигнина, который в разные периоды сбрасывался в карты Бабхинского полигона, но и с бытовыми отходами близлежащих поселков, работой железной и автомобильной дорог, расположенных недалеко от полигона (см. рис. 1).

Следует отметить, что содержание практически всех загрязняющих компонентов существенно снижается, приближаясь или становясь равным ПДК, на северо-северо-востоке, особенно это заметно на площади карты № 12 (см. рис. 7). Вероятнее всего, высокие фильтрационные свойства валунно-галечных неоген-четвертичных отложений этой территории (см. рис. 4) способствуют вымыванию загрязняющих компонентов. Кроме того, снижение содержания загрязняющих веществ может быть связано с естественным вымораживанием коллоидных осадков шлам-лигнина^{5,17}.

Предлагаются различные способы ликвидации накопленных отходов, включая био-

логический способ очистки надшламовой воды растением эйхорния, полный передел шлам-лигнина и золошлаковых отходов из карт-накопителей № 13 и 14 Бабхинского полигона на виброформовочном оборудовании в массовую товарную строительную продукцию¹⁸. Исследователи Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия) считают, что весьма эффективной является технология интенсификации протекания природных процессов, заключающаяся в вымораживании лигнинсодержащих осадков, в процессе чего улучшаются их водоотдающие свойства, до 40 % снижается объем осадков, а также происходит снижение концентрации токсичных органических веществ за счет их перехода в водную фазу (десорбция), что ведет к снижению токсичности осадков шлам-лигнина и зольных осадков, в дальнейшем ученые Иркутского национального исследовательского технического университета предлагают использовать получившийся субстрат в сельском хозяйстве в качестве почвогрунтов и удобрений¹² [17]. Специалисты Уральского федерального университета (г. Екатеринбург, Россия) предлагают использовать отходы целлюлозно-бумажного производства (лигносульфонаты) в процессе переработки руд, содержащих тяжелые и благородные металлы [18].

Заключение

Таким образом, в подземных водах наиболее высокое содержание химических компонентов-загрязнителей соответствует территории карты № 14 и граничащей с ней территории карты № 13, включая тяжелые металлы: свинец, железо, мышьяк, марганец, сурьму, а также повышенные показатели мутности и цветности воды.

¹⁵ Терентьева Э.П., Удовенко Н.К., Павлова Е.А. Комплексная химическая переработка древесины: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУПТД, 2012. 74 с.

¹⁶ РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-н/Д, 2016. 104 с.

¹⁷ Обман на 3,5 миллиарда рублей: «Росгеология» рекультивирует только 5 шламонакопителей БЦБК из 14 // Pikabu.ru. Режим доступа: https://pikabu.ru/story/obman_na_35_milliarda_rubley_rosgeologiya_rekultiviruet_tolko_5_shlamonakopiteley_btsbk_iz_14_5967731 (дата обращения 26.02.2025).

¹⁸ Отчет на выполнение экспертных работ по теме «Анализ технологических предложений и проведение первичной научно-технической экспертизы концепции ликвидации накопленного вреда окружающей среде, образовавшегося в процессе деятельности открытого акционерного общества «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат», на полигоне «Солзанский» и территории, занятой канализационно-очистными сооружениями с производственными помещениями, содержащими черный щелок». Аналитическая записка «Анализ технологических предложений по ликвидации накопленного экологического вреда на Солзанском полигоне и щелокосодержащей жидкости» / сост. И.В. Бычков, Ю.Л. Беккер, А.Н. Додонов [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2021. 386 с.



Источники загрязнения достаточно разнообразны: это шлам-лигнин, зольная пульпа и зола теплоэлектроцентрали, зеленый щелок, отходы коры, бытовые отходы близлежащих поселков, стоки с железной и автомобильных дорог.

Подходы к ликвидации шлам-лигнина разрабатываются, и некоторые из них уже апробированы на картах БЦБК [17].

В то же время нельзя забывать, что шлам-лигнин – не единственный источник загрязнения подземных вод. Остается открытым вопрос ликвидации тяжелых металлов, которые продолжают поступать в подземные воды. Существует ряд разработок в этой области, в том числе методика иммобилизации тяжелых металлов с помощью биоугля¹⁹ [15, 19], которая пока находится на стадии опытных испытаний.

Вероятнее всего, в настоящее время наиболее реальный подход к ликвидации нако-

пленного экологического вреда и предотвращения дальнейшего загрязнения подземных вод заключается не только в интенсификации начатой многоступенчатой биологической и химической очистки надшламовых вод, но и в последующей рекультивации территории с использованием водоупорных материалов для покрытия дна и бортов золошламоотвалов, создании противоподавковых и противоселевых сооружений [20, 21].

Оценка воздействия шламонакопителей на подземные воды в прибрежной зоне озера Байкал требует комплексного подхода, включая научные исследования, мониторинговые наблюдения за распространением загрязняющих компонентов в подземных водах. В создавшейся ситуации решение перечисленных проблем критически важно для сохранения уникальной экосистемы Байкальского региона.

Список источников

1. Гринь Н.Н., Ланкин Ю.К., Рященко Т.Г. Изучение техногенных грунтов гидротехнических сооружений в рамках реализации проекта рекультивации отходов Байкальского ЦБК // Сергеевские чтения: материалы науч. конф. в рамках IX Междунар. форума «Экология» (г. Москва, 22 марта 2018 г.). М.: Изд-во РУДН, 2018. Вып. 20. С. 112–117. EDN: YVYAFN.
2. 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. № 4. С. 67–80. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80>. EDN: NABTBZ.
3. Рекультивация полигонов промтоходов Байкальского ЦБК: проблемы и решения: материалы Междунар. науч. конф. / под ред. Ю.А. Дамбинова, А.Н. Сутурина (г. Новосибирск, 10–15 июня 2013 г.). Новосибирск, 2013. С. 91–93.
4. Beaumais A., Mangeret A., Suhard D., Blanchart P., Neji M., Cazala C., et al. Combined U-Pb isotopic signatures of U mill tailings from France and Gabon: a new potential tracer to assess their fingerprint on the environment // Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 430. P. 128484. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128484>.
5. Fuhrmann M., Benson C.H., Likos W.J., Stefani N., Michaud A., Waugh W.J., et al. Radon fluxes at four uranium mill tailings disposal sites after about 20 years of service // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 237. P. 106719. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106719>.
6. Androkhonov V.A., Boguslavsky A.E., Sokolov D.A., Filonova Yu.O., Uzhogova A.A. Soil-ecological assessment of recultivation at the spoils of coal deposits // Chemistry for Sustainable Development. 2023. Vol. 31. Iss. 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.15372/CSD2023433>. EDN: AESHPZ.
7. Safonov A.V., Popova N.M., Boguslavsky A.E., Gaskova O.L., Naimushina O.S., Boldyrev K.A. Geochemical modeling of the uranium behavior in groundwater near the sludge storages during bioremediation // Geochemistry International. 2021. Vol. 59. Iss. 1. P. 55–65. <https://doi.org/10.1134/S0016702921010080>. EDN: VCEYPL.
8. Богданов А.В., Федотов К.В., Шатрова А.С. Разработка научно-технических основ для экологически безопасной утилизации накопленных отходов целлюлозно-бумажной промышленности Байкальского региона: монография. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2020. 187 с.
9. Аузина Л.И. Один из подходов к оптимизации поисково-оценочных работ на воду на месторождениях нефтегазового комплекса Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 6. С. 82–88. EDN: ULNYOH.
10. Аузина Л.И. Системно-модельный анализ при оценке гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 1. С. 90–101. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4232>. EDN: SRJQJA.
11. Шебест А.А. О влиянии золошлакоотвала на грунтовые воды // Инновационная наука. 2015. № 12-3. С. 276–278. EDN: VCFDJJ.

¹⁹ Шатрова А.С. Разработка экологически безопасной технологии переработки накопленных коллоидных осадков шлам-лигнина ОАО «Байкальский ЦБК»: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Иркутск, 2018. 150 с.



12. Извекова Т.В., Гусев Г.И., Гордина Н.Е., Ситанов Р.Д., Гуцин А.А. Оценка влияния шламонакопителя железосодержащих отходов на компоненты окружающей среды // *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*. 2024. Т. 67. № 11. С. 145–153. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246711.7140>. EDN: BEZCSY.
13. Богданов А.В., Шкрабо А.И., Шатрова А.С. Технологические решения рекультивации промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» // *Науки о Земле и недропользование*. 2023. Т. 46. № 1. С. 84–96. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>. EDN: DZMCEJ.
14. Аузина Л.И. Типизация гидрогеологических условий на месторождениях полезных ископаемых методом системного анализа // *Науки о Земле и недропользование*. 2023. Т. 46. № 3. С. 282–288. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-282-288>. EDN: RAFZNQ.
15. Качор О.Л., Сарапулова Г.И., Богданов А.В. Исследования возможности иммобилизации подвижных форм мышьяка в техногенных субстратах // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 596–602. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.596>. EDN: YKIYOH.
16. Парадина Л.Ф., Павлова Л.А., Чупарина Е.В., Пахомова Н.Н., Алешкова О.В., Хахураев О.А. [и др.]. Особенности состава зол углей ТЭЦ Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) // *Современные проблемы геохимии: материалы Всерос. совещания, посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Л.В. Таусона (с участием иностранных ученых) (г. Иркутск, 22–27 октября 2012 г.)*. Иркутск: Изд-во ИГХ СО РАН, 2012.
17. Тимофеева С.С. Чемерис Н.В. Шенькман Б.М. Современное состояние поверхностных, подземных и сточных вод в зоне воздействия шламонакопителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината // *Современные наукоемкие технологии*. 2008. № 5 (приложение). С. 13–19.
18. Lugovitskaya T.N., Rogozhnikov D.A. Construction of lignosulphonate-containing polymersomes and prospects for their use for elemental sulfur encapsulation // *Journal of Molecular Liquids*. 2024. Vol. 400. P. 124612. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124612>.
19. Качор О.Л. Разработка модели миграции мышьяка по почвенному профилю из накопленных отходов горно-перерабатывающей промышленности // *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 2. С. 144–150. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-144-150>. EDN: YPXJEO.
20. Сутурин А., Гончаров А., Дамбинов Ю., Куликова Н.Н., Мальник В.В., Дамбинова Е.Л. [и др.]. Ремедиация Солзанского полигона промтоходов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 2. С. 41–47. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-2-41-47>. EDN: TKXTEX.
21. Ильина О.А., Лундин Д.С., Проскурин Д.В., Ведерникова М.В., Бирюков Д.В. Материалы и технологии для радикального улучшения гидроизолирующих характеристик хранилищ РАО // *Радиоактивные отходы*. 2021. № 1. С. 51–62. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2021-1-51-62>. EDN: NQZFWW.

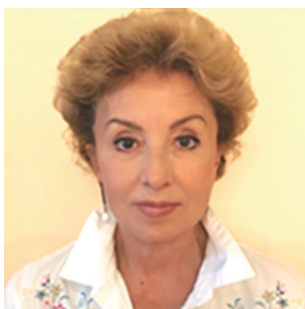
References

1. Grin' N.N., Lankin Yu.K., Ryashchenko T.G. Study of technogenic soils of hydraulic structures as a part of the implementation of the Baikal Pulp and Paper Mill waste reclamation project. In: *Sergeev readings: proceedings of the Scientific conference within the framework of the 9th International Ecology Forum*. 22 March 2018, Moscow. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba; 2018, iss. 20, p. 112-117. (In Russ.). EDN: YVYAFN.
2. Chebykin E.P., Dambinov Yu.A., Sutin A.N. Multi-element analysis of above-sludge waters in the accumulation cells of Baykalsk Pulp and Paper Mill for territory remediation strategy choosing. *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2020;4:67-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80>. EDN: NABTBZ.
3. Dambinov Yu.A., Sutin A.N. *Reclamation of industrial waste landfills of the Baikal Pulp and Paper Mill: problems and solutions: proceedings of the International scientific conference*. 10–15 June 2013, Novosibirsk. Novosibirsk; 2013, p. 91-93. (In Russ.).
4. Beaumais A., Mangeret A., Suhard D., Blanchart P., Neji M., Cazala C., et al. Combined U-Pb isotopic signatures of U mill tailings from France and Gabon: a new potential tracer to assess their fingerprint on the environment. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;430:128484. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128484>.
5. Fuhrmann M., Benson C.H., Likos W.J., Stefani N., Michaud A., Waugh W.J., et al. Radon fluxes at four uranium mill tailings disposal sites after about 20 years of service. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;237:106719. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106719>.
6. Androkhanov V.A., Boguslavsky A.E., Sokolov D.A., Filonova Yu.O., Uzhogova A.A. Soil-ecological assessment of recultivation at the spoils of coal deposits. *Chemistry for Sustainable Development*. 2023;31(1):1-12. <https://doi.org/10.15372/CSD2023433>. EDN: AESHPZ.
7. Safonov A.V., Popova N.M., Boguslavsky A.E., Gaskova O.L., Naimushina O.S., Boldyrev K.A. Geochemical modeling of the uranium behavior in groundwater near the sludge storages during bioremediation. *Geochemistry International*. 2021;59(1):55-65. <https://doi.org/10.1134/S0016702921010080>. EDN: VCEYPL.
8. Bogdanov A.V., Fedotov K.V., Shatrova A.S. *Development of scientific and technical foundations for the environmentally safe disposal of accumulated waste from the pulp and paper industry of the Baikal region*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2020, 187 p. (In Russ.).
9. Auzuna L.I. An approach to groundwater exploration optimization at oil and gas fields of Eastern Siberia. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2014;6:82-88. (In Russ.). EDN: ULNYOH.



10. Auzina L.I. System model analysis in estimating hydrogeological conditions of Eastern Siberia mineral deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(1):90-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4232>. EDN: SRJQJA.
11. Shebest A.A. On ash and slag disposal sites influence on groundwater. *Innovatsionnaya nauka*. 2015;12-3:276-278. (In Russ.). EDN: VCFDJJ.
12. Izvekova T.V., Gusev G.I., Gordina N.E., Sitanov R.D., Gushchin A.A. Assessment of the impact of a sludge reservoir for iron-containing waste on environmental components. *ChemChemTech*. 2024;67(11):145-153. (In Russ.). <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246711.7140>. EDN: BEZCSY.
13. Bogdanov A.V., Shkrabo A.I., Shatrova A.S. Process engineering solutions for reclamation of former Vostsibelemt battery plant industrial site. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):84-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-84-96>. EDN: DZMCEJ.
14. Auzina L.I. Typification of hydrogeological conditions in mineral deposits by system analysis method. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):282-288. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-282-288>. EDN: RAFZNQ.
15. Kachor O.L.1, Sarapulova G.I.1, Bogdanov A.V. Investigation of the possibility of immobilization of mobile forms of arsenic in technogenic soils. *Journal of Mining Institute*. 2019;239:596-602. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.596>. EDN: YKIYOH.
16. Paradina L.F., Pavlova L.A., Chuparina E.V., Pakhomova N.N., Aleshkova O.V., Khakhuraev O.A., et al. Composition features of coal ash from the Baikal Pulp and Paper Mill (BPPM) thermal power plant. In: *Modern problems of geochemistry: materials of the All-Russian meetings dedicated to the 95th birth anniversary of the Academician L.V. Tauson (with the participation of foreign scientists)*. 22–27 October 2012, Irkutsk. Irkutsk: A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science; 2012. (In Russ.).
17. Timofeyeva S.S. Chemeris N.V. Shen'kman B.M. Modern condition surface water, underground and sewage in a zone of influence of sludge tanks of Baikal Pulp-and-Paper Mill. *Modern high technologies*. 2008;5(appl.):1319. (In Russ.).
18. Lugovitskaya T.N., Rogozhnikov D.A. Construction of lignosulphonate-containing polymersomes and prospects for their use for elemental sulfur encapsulation. *Journal of Molecular Liquids*. 2024;400:124612. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124612>.
19. Kachor O.L. Modeling of arsenic migration from the accumulated mining industrial waste along the soil profile. *Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(2):144-150. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-144-150>. EDN: YPXJEO.
20. Suturin A.N., Goncharov A.I., Dambinov Yu.A., Kulikova N.N., Mal'nik V.V., Dambinova E.L., Chebykin E.P. Remediation of the Solzan industrial waste landfill at the Baikal Pulp and Paper Mill (BPPM). *Ecology & Industry of Russia*. 2021;25(2):41-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-2-41-47>. EDN: TKXTEX.
21. Ilyina O.A., Lundin D.S., Proskurin D.V., Vedernikova M.V., Biryukov D.V. Materials and technologies providing radical improvement of RW storage facility waterproofing capacities. *Radioactive waste*. 2021;1:51-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2021-1-51-62>. EDN: NQZFWV.

Информация об авторе / Information about the author



Аузина Лариса Ивановна,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
руководитель лаборатории гидрогеологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

✉ lauzina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>

Larisa I. Auzina,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Head of the Hydrogeology Laboratory,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

✉ lauzina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Л.И. Аузина является членом редакционной коллегии журнала «Науки о Земле и недропользование» с 2018 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах автор не заявлял.

Larisa I. Auzina has been a member of the editorial board of the Earth Sciences and Subsoil Use journal since 2018, but she did not take part in making decision about publishing the present article. The article was peer reviewed following the journal's review procedure. The author does not report any other conflicts of interests.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 15.10.2025; одобрена после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The article was submitted 15.10.2025; approved after reviewing 19.11.2025; accepted for publication 08.12.2025.