

УДК 502.5 + 551.4

DOI: 10.15372/GIPR20210117

С.Г. ПЛАТОНОВА*, О.И. КАЛЬНАЯ**, В.В. СКРИПКО*., Ю.Г. КОПЫЛОВА****, А.А. ХВАЩЕВСКАЯ****

*Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия, sgplatonova@mail.ru, skripko@inbox.ru

**Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,
667007, Кызыл, ул. Интернациональная, 117а, Россия, kalnaja@mail.ru

***Алтайский государственный университет,
656038, Барнаул, пр. Ленина, 61, Россия, skripko@inbox.ru

****Проблемная научно-исследовательская лаборатория гидрогеохимии
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
634050, Томск, пр. Ленина, 30, Россия, unpc_voda@mail.ru

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАСЕЙНОВОГО ПОДХОДА (НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ХОВУ-АКСЫНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, РЕСПУБЛИКА ТЫВА)

Проведенный для оценки экологического состояния подземных вод бассейновый анализ в районе Хову-Аксынского арсенидно-кобальто-сульфидного месторождения (Республика Тыва), расположенного на левом берегу р. Элегест, совместно с полевыми морфометрическими исследованиями и гидрогеохимическим опробованием выявил, что химический состав подземных вод в значительной степени определяется бассейновой организацией территории. Рассчитанные для бассейна Хову-Аксынского лога структурные индексы площадей, длин, уклонов и бифуркации, а также геоморфологическая работа указывают на то, что в его пределах изменяется функциональный тип зеньев бассейнов 3-го порядка по выносу и накоплению водных и литопотоков: от сбрасывателя (в верхнем звене) до накопителя (в среднем) и транзитного (в интегральном нижнем звене). В соответствии с типом бассейнов установлено, что химизм подземных вод формируется преимущественно в среднем и нижнем звеньях бассейна под воздействием как природных, так и антропогенных источников. По мере удаления от источников загрязнения в подземных водах делювиально-пролювиального горизонта появляются ореолы, отражающие уменьшение значений общей минерализации (от 0,68 до 0,3 г/л), жесткости (от 7,1 до 3,2 мг-экв/л) и мышьяка (от 0,013 до менее 0,005 мг/л). Практическое отсутствие загрязнения воды рудообразующими тяжелыми металлами (никель, кобальт, медь), характерными для месторождения и хвостохранилищ, также объясняется транзитной специализацией интегрального звена водосборного бассейна. Полученные результаты показывают возможность его использования в моделировании условий выноса и аккумуляции загрязнения природного и антропогенного происхождения для подземных водоносных горизонтов.

Ключевые слова: бассейновый анализ, структурные индексы, геоморфологическая работа, хвостохранилища, водоносный горизонт, гидрогеохимический состав.

S.G. PLATONOVA*, O.I. KAL'NAYA**, V.V. SKRIPKO*., Yu.G. KOPYLOVA****, A.A. HVASHCHEVSKAYA****

*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
656038, Barnaul, ul. Molodezhnaya, 1, Russia, sgplatonova@mail.ru, skripko@inbox.ru

**Tuviniian Institute for Exploration of Natural Resources, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
667007, Kyzyl, ul. Internatsional'naya, 117a, Russia, kalnaja@mail.ru

***Altai State University, 656038, Barnaul, pr. Lenina, 61, Russia, skripko@inbox.ru

****Research Laboratory for Hydrogeochemistry, National Research Tomsk Polytechnic University,
634050, Tomsk, pr. Lenina, 30, Russia, unpc_voda@mail.ru

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE STATUS OF GROUNDWATER USING THE BASIN APPROACH (A CASE STUDY OF THE AREA OF THE KHOVU-AKSYNSKII DEPOSIT, TYVA REPUBLIC)

The basin analysis for assessing the status of groundwater on the Khovu-Aksynskii arsenide-cobalt-sulfide deposit (Tyva Republic) located on the left bank of the Elegest river was carried out together with field morphometric studies and hydrogeochemical

sampling. It was determined that the chemical composition of groundwater is largely dependent on the basin organization of the territory. The structural indices of areas, lengths, slopes and bifurcation calculated for the Khovu-Aksynskii gully basin, and also the geomorphological work indicate that within its limits the functional type of the 3rd order basin components on removal and accumulation of water and lithodynamic flows changes from the denudation (in the upper component) to the accumulation (in the middle) and transition — in the integral lower component. In accordance with the type of basins, it has been established that the groundwater chemistry is formed mainly in the middle and lower components of the basin under natural and anthropogenic impact. With distance from the pollution sources, the halos are formed in the groundwater of deluvial-proluvial horizon, reflecting a decrease in the total mineralization (from 0.68 to 0.3 g/L), hardness (from 7.1 to 3.2 mg-eqv/L) and arsenic (from 0.013 to less than 0.005 mg/L). The absence of water pollution by ore-forming heavy metals (nickel, cobalt and copper) typical for the deposit and tailing dumps is also explained by the transitional type of integral component of the catchment basin. The results obtained show the possibility of using it in modeling the conditions for denudation and accumulation of natural and anthropogenic pollutants in the underground aquifers.

Keywords: basin analysis, structural indices, geomorphological work, tailing dump, aquifer, hydrogeochemical composition.

ВВЕДЕНИЕ

Морфометрические работы по изучению водосборных бассейнов дают надежные основания для суждения об особенностях их строения и функционирования [1], а также для анализа большого числа проблем, в том числе и геоэкологического ряда [2]. В основу этих работ положена методология оценки функционирования бассейнов через соотношения закодированных относительных характеристик элементов их структуры (структурных индексов), разработанная и апробированная группой исследователей под руководством Ю.Г. Симонова [3] и их последователями [4–6]. Количественный анализ водосборов широко представлен и в работах зарубежных ученых, как при гидрологических построениях (А.Н. Стралер, Р.Л. Шрив, А. Шайдеггер, Р.Дж. Чорли, С.А. Шумм, Д. Найтон и др. [7, 8]), так и при геоморфологических и экологических исследованиях [9–11].

Район Хову-Аксинского комплексного арсенидно-кобальто-сульфидного месторождения (Республика Тыва), расположенного в пределах широкого лога, характеризуется высоким природным фоном содержания тяжелых металлов и мышьяка. Разработка, обогащение руд и складирование в хвостохранилищах (картах-накопителях) отходов гидрометаллургического передела в 1970–1991 гг. сопровождалось значительным антропогенным загрязнением этими элементами атмосферного воздуха, почв, растительности, а также поверхностных вод р. Элегест — левого притока верхнего Енисея [12]. И хотя с тех пор прошло почти 30 лет, загрязнение от хвостохранилищ продолжается [13]. Учитывая, что элементы структуры бассейнов связаны между собой системой стока поверхностных и подземных вод, а также твердых потоков [14], то для оценки состояния подземных вод первого от поверхности водоносного горизонта, которому было уделено наименьшее внимание при предшествующих экологических работах, был применен бассейновый анализ.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хову-Аксинское арсенидно-кобальто-сульфидное месторождение находится в Чеди-Хольском кужууне Республики Тыва (см. рисунок, *а*) на северном макросклоне хр. Западный Танну-Ола в области его сочленения с хр. Восточный Танну-Ола. Геоморфологическая позиция месторождения определяется расположением в пределах водосбора межгорного Хову-Аксинского лога, протянувшегося с северо-запада на юго-восток и выходящего в долину р. Элегест на ее субширотном участке. Лог характеризуется асимметричным поперечным профилем. Тальвег основного русла прижимается к подножию правого склона. Склоны и днище лога выполнены осадками делювиально-пролювиального шлейфа, образующего наклонную поверхность с углом наклона 6–8°, рассеченную многочис-

Бассейн Хову-Аксинского лога: местоположение (*а*), структура (*б*) и распределение в подземных водах общей минерализации (*в*) и мышьяка (*г*).

Русла: 1 — первого порядка, 2 — второго, 3 — третьего. Склоны, опирающиеся на русла: 4 — первого порядка, 5 — второго, 6 — третьего. Геоморфологические элементы: 7 — склоны хребтов; поверхность: 8 — делювиально-пролювиального шлейфа, 9 — поймы р. Элегест. Месторождение Хову-Аксы: 10 — горно-обогажительный комбинат «Хову-Аксы», 11 — карты-накопители; 12 — уровень распространения материала коры выветривания. Направленные гидро- и литопотоков: 13 — антропогенных, 14 — природных. 15 — места отбора проб; 16 — изолинии равных концентраций общей минерализации (*в*) и мышьяка (*г*); 17 — горизонтали рельефа с высотой сечения 10 м.

ленными эрозионными формами. В условиях аридного климата большую часть времени русла в пределах лога сухие. Хову-Аксинский лог обрамляется со всех сторон горными хребтами, представляющими низкогорный резко расчлененный мелкосопочный тип рельефа с абсолютными высотами от 800 до 1500 м и относительными превышениями от 50 до 300 м [15]. Гребневая линия водоразделов рассечена, склоны крутые с мелким и густым эрозионным расчленением. Рыхлый обломочный материал приводораздельных частей большей частью удален временными водотоками.

Геохимический фон в районе месторождения характеризуется повышенными концентрациями элементов, содержащихся в сульфидных, окисных и арсенидных минералах (железо, кобальт, медь, никель, сурьма, цинк и мышьяк) [13]. Верхняя часть геологического разреза сложена суглинисто-дресвяно-щебнистыми делювиально-пролювиальными отложениями верхнего неоплейстоцена–голоцена и песчано-валунно-галечными аллювиальными образованиями голоцена поймы р. Элегест, которые являются водовмещающими, соответственно, для делювиально-пролювиального и аллювиального водоносных горизонтов. Состав делювиально-пролювиальных осадков значительно варьирует в зависимости от уровня относительно дна лога. На верхнем уровне высока доля красноцветных глин — переотложенных продуктов мел-палеогеновой коры выветривания (источника трехвалентного железа, кальция и магния). На среднем уровне преобладают буроцветные образования преимущественно щебнистого размера, на нижнем — дресвяно-щебнистые отложения со значительной долей алевритов.

Следует сказать, что выбор объекта исследования в значительной мере экспериментален, так как представляет собой не водосбор крупной реки, как, например, в вышеназванных опубликованных работах, а протяженный широкий лог в тектонически предопределенной горной долине, прорабатываемый временным водотоком в условиях резко континентального аридного климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бассейновый анализ. Особенности движения литопотоков внутри бассейна определяются на основе анализа структуры бассейна. Для этого русла и опирающиеся на них склоны разделяются на порядки в соответствии с системой Стралера–Философова [16] (см. рисунок, б). Характеристики отдельных элементов кодируются по методике Ю.Г. Симонова [14, 17] в виде индексов структуры площадей (ИСП), длин (ИСД), уклонов (ИСУ), бифуркации (ИСБ) и сопоставляются с параметрами модального бассейна [14]. Затем на основе рассчитанных индексов производится расчет геоморфологической работы (М) для разных звеньев бассейна и ее показателей на узлах слияния русел разного порядка (U — соотношение уклонов, T — транзитность стока наносов и P — уровень гашения импульса). Полученные параметры позволяют определить специализацию разных звеньев бассейна по отношению к выносу/накоплению потоков как сбрасывателей, накопителей или выполняющих транзитную функцию. Результаты бассейнового анализа сравниваются с полевыми морфологическими исследованиями.

Масштаб исследования (1:500 000) выбран эмпирически с тем расчетом, чтобы водосборный бассейн исследуемого лога имел удобный для анализа 3-й порядок.

Отбор гидрогеохимических проб. Основные выводы бассейнового анализа были проанализированы совместно с данными гидрогеохимического опробования. Пробы отобраны по стандартной методике [18] 20 января и 3 июня 2018 г. (далее запись нумерации проб: «зима»/«лето») в пос. Сайлыг из колодцев и скважин, созданных для целей водоснабжения населения. Гидрогеохимическое опробование проведено в приустьевой части нижнего интегрального звена Хову-Аксинского лога из подземных вод делювиально-пролювиального горизонта в зоне загрязняющего влияния карт-накопителей (шесть скважин: пробы № 1/16–3/18 и 6/21–8/23). Кроме того, для сравнения были опробованы воды аллювиального горизонта из колодцев на левом берегу р. Элегест в полосе возможного загрязняющего воздействия хвостохранилищ (пробы № 4/19) и вне этого воздействия на правом берегу (№ 5/20).

Химический анализ водных проб выполнялся в Аналитической лаборатории ООО «Тувинская ГРЭ» (зима) и Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета (лето). Полученные результаты сравнивались с требованиями к питьевым водам [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты бассейнового анализа. Геоморфологическая работа по выносу/накоплению водных и литодинамических потоков в исследуемом бассейне Хову-Аксинского лога распределена неравно-

Показатели бассейновой организации территории

| Бассейн | Распределение работы внутри бассейна | | | Соотношение уклонов в узлах слияния | | Транзитность стока наносов | | Уровень гашения импульса | |
|-------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------|----------------------------|-------|--------------------------|-------|
| | M_1 | M_2 | M_3 | U_1 | U_2 | T_1 | T_2 | P_1 | P_2 |
| Модальный по [14] | 4,17 | 10,0 | 3,3 | 2 | 3 | 1,67 | 4 | 0,56 | 0,62 |
| Лога Хову-Аксы | 9,6 | 6,0 | 4,0 | 2 | 3 | 1 | 4 | 0,25 | 0,8 |

мерно по всем звеньям. Верхнее звено его бассейна при средней длине русел (ИСД = 145) и уклоне (ИСУ = 631 и $U_1 = 2$ — его производного показателя в узлах слияния русел 1-го и 2-го порядков), соответствующих модальным, имеет уменьшенную площадь (ИСП = 442, что в 1,3 раза меньше, чем у модального бассейна) и очень высокую степень расчленения поверхности руслами временных водотоков (ИСБ = 155). Для верхних частей склонов лога характерно максимальное значение геоморфологической работы ($M_1 = 9,6$), а также низкие значения уровня гашения импульса ($P_1 = 0,25$) и транзитности стока ($T_1 = 1$) в узлах слияния русел 1-го и 2-го порядков (табл. 1). Это отражает условия преобладания процессов эрозии над процессами аккумуляции, выноса литопотоков на более низкий гипсометрический уровень (во второе звено), и определило тип функционирования бассейнов 1-го порядка как бассейнов-сбрасывателей.

Полученные данные хорошо подтверждаются полевыми морфологическими исследованиями. На большей своей части привершинные части склонов имеют маломощный чехол, несут черты высокой степени эродированности поверхности и освобождены от продуктов коры выветривания, которые вскрываются на склонах среднего звена бассейнов.

Среднее звено исследуемого лога, дренируемое тальвегами второго порядка, характеризуется повышенной долей водосборной площади (ИСП = 442, что на 10 % выше, чем у модального бассейна) и превышающими модальные значения показателями длины (ИСД = 145) при нормальных уклонах. Геоморфологическая работа ($M_2 = 6$) значительно ослабевает по сравнению с работой в верхнем звене, уровень гашения импульса в узлах слияния второго и третьего порядков ($P_1 = 0,8$) имеет повышенное значение. Значения бифуркации (ИСБ = 155) здесь, как и в верхнем звене, очень высокие. На большей своей части водотоки второго порядка дренируют слабонаклонную поверхность делювиально-пролювиального шлейфа. Вынос литопотоков на более низкий гипсометрический уровень (в третье звено) компенсируется их аккумуляцией, которая преобладает над эрозией, что определило тип функционирования бассейнов 2-го порядка как бассейнов-накопителей.

Геоморфологическая работа в пределах нижнего интегрального звена (тальвега 3-го порядка) характеризуется значениями ($M_3 = 4$), близкими к модальным, но низкими относительно работы в других звеньях. В этой части бассейна лога русло имеет относительно небольшую длину (ИСД = 145) при нормальных уклонах и площадях водосбора. Для нижнего звена при соответствующих условиях увлажнения актуальны примерно одинаково проявленные процессы эрозии и аккумуляции, что, соответственно, определяет транзитный тип бассейна. В условиях дефицита влаги в нижнем звене основную эрозионную работу делают временные потоки во время паводков, что на местности видно в формировании достаточно углубленного русла 3-го порядка, а работа по транспортировке/аккумуляции литопотоков сосредоточена в верхнем и среднем звеньях бассейна лога. В то же время здесь активно происходят и процессы аккумуляции. В тальвеге 3-го порядка отмечено, как после сбросов воды из хвостохранилищ комбината произошло углубление русла до 1,2 м, которое фактически сразу было компенсировано осаденным шламовым материалом из сбросовых вод (мощностью 1,1 м).

Таким образом, геоморфологическая работа в пределах лога для разных звеньев изменяется: от сбрасывателя — в верхней части бассейна, накопителя — в средней и транзита — в интегральном нижнем звене. Следует отметить, что, учитывая аридность современного климата, основная геоморфологическая работа, видимо, была реализована в геологические эпохи позднего неоплейстоцена — голоцена с более влажным климатом.

Результаты гидрогеохимического опробования. По гидрохимическому составу подземные воды делювиально-пролювиального горизонта относятся к гидрокарбонатным кальциево-магниевым и

Таблица 2

Гидрохимический состав подземных вод в пос. Сайлыг

| Номер пробы | Общая минерализация, г/л | pH | Жесткость общая, мг-экв/л | Содержание макрокомпонентов, мг/л | | | | | | | | | | Дата отпробования | Место отбора проб | | |
|---|--------------------------|------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Fe _{общ} | SiO ₂ | NH ₄ ⁺ | | | NO ₂ ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| Аллювиальный водоносный горизонт | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0,41 | 7,62 | 4,00 | 268,48 | 6,00 | 15,95 | 25,28 | — | 52,10 | 17,01 | 0,10 | 18,0 | 0,04 | 0,01 | 8,15 | 20.01.18. | ул. Матросова |
| 19 | 0,43 | 7,32 | 3,85 | 299,00 | 16,95 | 10,71 | 28,20 | 2,97 | 53,42 | 14,48 | 0,046 | — | 0,06 | 0,03 | 11,4 | 03.06.18. | |
| 5 | 0,14 | 7,84 | 1,60 | 91,53 | 5,00 | 5,32 | 3,44 | — | 24,05 | 4,86 | 0,09 | 6,0 | 0,03 | 0,01 | 0,12 | 20.01.18. | ул. Болотная |
| 20 | 0,17 | 8,08 | 1,36 | 120,00 | 2,81 | 1,48 | 3,55 | 0,75 | 22,91 | 2,60 | 0,032 | — | ≤0,05 | ≤0,02 | 3,30 | 03.06.18 | |
| Делювиально-пролювиальный водоносный горизонт | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,61 | 7,73 | 6,30 | 286,78 | 77,00 | 78,0 | 50,81 | — | 44,09 | 49,83 | 0,200 | 18,0 | 0,15 | 0,03 | 1,50 | 20.01.18 | ул. Пролетарская |
| 16 | 0,67 | 7,52 | 6,10 | 283,00 | 128,6 | 64,13 | 100,70 | 2,39 | 51,96 | 43,14 | 0,045 | — | ≤0,05 | ≤0,02 | 8,40 | 03.06.18 | |
| 2 | 0,42 | 7,81 | 4,30 | 262,37 | 7,50 | 28,36 | 26,91 | — | 36,07 | 30,38 | 0,220 | 16,0 | 0,15 | 0,01 | 14,50 | 20.01.18 | ул. Горького |
| 17 | 0,42 | 8,23 | 3,50 | 261,00 | 24,42 | 15,07 | 34,37 | 1,63 | 35,87 | 20,96 | 0,041 | — | ≤0,05 | ≤0,02 | 12,90 | 03.06.18 | |
| 3 | 0,30 | 7,89 | 3,20 | 195,26 | 6,50 | 14,18 | 12,76 | — | 36,07 | 17,01 | 0,340 | 16,0 | 0,03 | 0,01 | 2,44 | 20.01.18 | ул. Горная |
| 18 | 0,29 | 7,27 | 2,65 | 195,00 | 13,54 | 8,79 | 26,22 | 1,11 | 36,28 | 10,28 | 0,036 | — | 0,17 | ≤0,02 | 3,01 | 03.06.18 | |
| 6 | 0,68 | 6,92 | 7,10 | 250,17 | 142,00 | 99,27 | 63,80 | — | 50,10 | 55,90 | 0,070 | 12,0 | 0,13 | 0,01 | 1,74 | 20.01.18 | ул. Маяковского |
| 21 | 0,65 | 8,04 | 6,00 | 244,00 | 141,00 | 79,56 | 80,20 | 2,25 | 52,93 | 40,71 | 0,00073 | — | ≤0,05 | 0,16 | 37,30 | 03.06.18 | |
| 7 | 0,65 | 7,72 | 6,80 | 256,27 | 96,00 | 99,27 | 57,60 | — | 52,10 | 51,04 | 0,210 | 16,0 | 0,40 | 0,01 | 21,00 | 20.01.18 | ул. Терешковой |
| 22 | 0,66 | 7,64 | 6,10 | 272,00 | 125,40 | 77,94 | 70,17 | 2,25 | 54,63 | 41,16 | 0,0009 | — | 0,06 | 0,09 | 20,60 | 03.06.18 | |
| 8 | 0,54 | 7,84 | 5,40 | 311,20 | 24,00 | 42,54 | 40,82 | — | 40,08 | 41,32 | 0,140 | 12,0 | 0,15 | 0,02 | 24,20 | 20.01.18 | ул. Степная |
| 23 | 0,55 | 8,09 | 4,50 | 285,00 | 72,37 | 28,88 | 72,50 | 2,27 | 38,00 | 31,68 | 0,033 | — | ≤0,05 | ≤0,02 | 26,50 | 03.06.18 | |

Примечание. Пробел – макрокомпонент не определялся. Жирным шрифтом выделен макрокомпонент, содержание которого превышает ПДК.

смешанного катионного состава с преобладанием ионов магния. Обобщенная формула солевого состава имеет следующий вид:

$$M_{0,3-0,68} \frac{HCO_3(40-85)SO_4(3-30)Cl(7-28)CO_3(0-6)NO_3(0-6)}{Ca(23-48)Mg(23-47)(Na+K)(15-45)}.$$

В пробах воды отмечена преимущественно повышенная минерализация (0,42–0,68 г/л), а также достаточно высокая жесткость (3,2–7,1 мг-экв/л, воды — от умеренно жестких до жестких) за счет повышенного содержания ионов магния и кальция. Водная среда характеризуется от нейтральной до слабощелочной (рН = 6,92–8,09) (табл. 2).

Подземные воды аллювиального водоносного горизонта в зоне выклинивания делювиальных вод из колодца на левом берегу р. Элегест в целом пресные с минерализацией 0,41 г/л (проба № 4) и 0,43 г/л (№ 19), по химическому составу — гидрокарбонатные смешанного катионного состава с преобладанием ионов кальция. Воды характеризуются как умеренно жесткие (4,0 мг-экв/л — зимой, 3,85 — летом), слабощелочные зимой (рН = 7,62) и нейтральные летом (рН = 7,32). Высокую жесткость воды определяют содержащиеся в воде ионы кальция и магния.

Воды аллювиального горизонта правобережья р. Элегест ультрапресные с минерализацией от 0,14 г/л (проба № 5) до 0,17 г/л (№ 20), по химическому составу гидрокарбонатные магниевые-кальциевые (зимой) и карбонат-гидрокарбонатные кальциево-натриевые (летом). Воды мягкие (зимой) общая жесткость 1,60 мг-экв/л и очень мягкие (летом 1,36 мг-экв/л) при ПДК 7,0 мг-экв/л. Водная среда слабощелочная (рН = 7,84–8,08).

Анализ гидрогеохимических проб выявил, что содержание основных химических компонентов в подземных водах исследуемых водоносных горизонтов в целом отражает условия континентального засоления. При этом для делювиально-пролювиальных вод с минерализацией 0,61–0,68 г/л (пробы № 1/6, 16/21) характерны отношения $SO_4^{2-}/Cl^- = 0,3-1,4$ в зимнее время и их некоторое увеличение до 2 летом (из-за снижения концентрации хлора и возрастания содержания сульфатов и натрия). Близким поведением характеризуется и отношение Na^+/Cl^- : 0,9–1,0 зимой и до 1,4–2,4 летом. Увеличение значений отношения Na^+/Cl^- в летнее время представляет собой показательный коэффициент усиления процессов обогащения вод сульфатами и натрием в слабощелочных с минерализацией 0,30–0,55 г/л водах горизонта (в пробах № 3/18, 2/17 и 8/23). В них отношение SO_4^{2-}/Cl^- составляет 0,3–0,6 зимой и повышается летом за счет увеличения сульфатов одновременно с повышением в водах натрия. Возможно, это происходит из-за усиления процессов окисления сульфидов и гидролиза алюмосиликатов. В летнее время в этих водах происходит некоторое снижение содержания хлора при практически не меняющихся концентрациях кальция и магния.

Влияние процессов континентального засоления также отражено в слабощелочных водах (с минерализацией 0,143–0,17 г/л) аллювиального горизонта на правом берегу р. Элегест (пробы № 5/20). Коэффициент SO_4^{2-}/Cl^- здесь близок к единице, что сопровождается уменьшением концентраций хлора летом при мало меняющихся содержаниях сульфатов и увеличением значений SO_4^{2-}/Cl^- до 1,9 зимой. Отношение Na^+/Cl^- , также близкое к единице зимой, увеличивается летом до 3,7 за счет уменьшения концентраций хлора.

Содержание анионов и катионов в целом не превышает санитарных норм для питьевых вод. Концентрация железа общего (при ПДК = 0,3 мг/л) составляет в аллювиальных водах от 0,0032 (проба № 20) до 0,1 (№ 4) мг/л, в водах делювиально-пролювиального горизонта — от 0,009 (№ 22) до 0,22 (№ 2) мг/л. И лишь в пробе № 3 содержание железа равно 1,13 ПДК (0,34 мг/л).

Тяжелые металлы, такие как свинец, кадмий, никель и кобальт, формирующие геохимический фон Хову-Аксынского месторождения, в подземных водах не обнаружены. Выявленные в аллювиальных водах содержания цинка, меди и марганца не превышают норм для питьевых вод. Концентрация мышьяка определяется на пределе чувствительности прибора и составляет менее 0,005 мг/л (№ 2, 4, 5), 0,0074 мг/л (№ 8), 0,0076 мг/л (№ 1), 0,01 мг/л (№ 6) и 0,013 мг/л (№ 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидрогеохимия первого от поверхности водоносного горизонта во многом определяется бассейновой организацией территории. Рассматривая формирование делювиально-пролювиального водоносного горизонта в пределах Хову-Аксынского лога с привлечением данных бассейнового анализа,

можно сказать, что область его питания совпадает с площадями бассейнов 1-го порядка, где залегают маломощный чехол обломочного материала, что способствует интенсивной фильтрации атмосферных осадков и формированию этого горизонта.

Область транзита водоносного горизонта совпадает по площади со средним и, частично, нижним геоморфологическими звеньями. На основании проведенного анализа можно предположить, что химизм подземных вод в большей степени формируется именно в среднем звене бассейна в результате воздействия природных источников — переотложенных продуктов коры выветривания. Аккумулируясь в пределах бассейнов-накопителей, они «поставляют» в подземные воды ионы трехвалентного железа, кальция, магния, тем самым определяя повышенные значения общей минерализации и жесткости вод делювиально-пролювиального водоносного горизонта среднего и нижнего звена.

В нижнем интегральном звене эрозионные и аккумулятивные процессы находятся примерно в равных соотношениях. В результате в устьевой части лога складывается гидрогеохимическая ситуация, определяемая транзитным характером водных и литопотоков не только природного, но и антропогенного происхождения (см. рисунок, б). Значения общей минерализации в подземных водах уменьшаются здесь от 0,68 до 0,3 г/л, общей жесткости — от 7,1 до 3,2 мг-экв/л, формируя ореолы рассеяния (см. рисунок, в), контуры которых практически идентичны для зимнего и летнего времени.

Область разгрузки водоносного горизонта совпадает с нижней частью геоморфологического интегрального звена. Здесь происходит перетекание делювиально-пролювиальных подземных вод в аллювиальный водоносный горизонт левобережья и формирование смешанных вод с повышенными показателями минерализации (0,41–0,43 г/л) и жесткости (3,85–4,0 мг-экв/л). Последние заметно отличаются от ультрапресных (0,14–0,17 г/л) очень мягких и мягких (1,36–1,60 мг-экв/л) аллювиальных вод правобережья р. Элегест, функционирующих в других геоморфологических условиях.

Практическое отсутствие загрязнения воды рудообразующими тяжелыми металлами (никель, кобальт, медь), характерными для месторождения и карт-накопителей, также объясняется транзитной специализацией интегрального звена водосборного бассейна. Следует отметить, что мышьяк, содержащийся в делювиально-пролювиальных подземных водах, несмотря на малые содержания (от 0,013 до <0,005 мг/л), по мере удаления от источников загрязнения также формирует ореолы в соответствии с направлением водных и литопотоков интегрального звена (см. рисунок, з).

Проведенный для оценки экологического состояния подземных вод бассейновый анализ совместно с полевыми морфометрическими исследованиями и гидрогеохимическим опробованием имеет предварительный характер. Полученные результаты показывают возможность его использования для моделирования условий накопления и аккумуляции загрязнения природного и антропогенного происхождения для подземных водоносных горизонтов.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института водных и экологических проблем СО РАН и Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Симонова Т.Ю.** Речные бассейны: полувековые итоги и пути будущих исследований // Эколого-географические исследования в речных бассейнах: Материалы V Всерос. науч.-практ. конф. — Воронеж: НАУКА-ЮНИПРЕСС, 2018. — С. 28–39.
2. **Бондарев В.П.** Геоэкологические аспекты изучения морфодинамики малых водосборных бассейнов // Эколого-географические исследования в речных бассейнах: Материалы V Всерос. науч.-практ. конф. — Воронеж: НАУКА-ЮНИПРЕСС, 2018. — С. 39–44.
3. **Динамическая геоморфология** / Под ред. Г.С. Ананьева, Ю.Г. Симонова, А.И. Спиридонова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. — 448 с.
4. **Тульская Н.И.** Эколого-геоморфологическое картографирование территории субъекта Российской Федерации (на примере Московской области): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. — 23 с.
5. **Новаковский Б.А., Симонов Ю.Г., Тульская Н.И.** Эколого-геоморфологическое картографирование Московской области. — М.: Научный мир, 2005. — 72 с.
6. **Опекунова М.Ю., Бардаш А.В., Тухта С.А.** Структурный анализ речных бассейнов Верхнего Приангарья (на примере бассейна реки Оёк) // География и природ. ресурсы. — 2018. — № 3. — С. 156–163.
7. **Knighton D.** Fluvial Forms and Processes. A New Perspective. — London: Arnold, 1998. — 384 p.
8. **Gordon N.D., Finlayson B.L., McMahon T.A., Gippel C.J., Nathan R.J.** Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists. 2nd Edition edition. — New York: John Wiley & Sons Ltd, 2004. — 430 p.

9. **Lin Z., Oguchi T.** Drainage density, slope angle, and relative basin position in Japanese bare lands from high-resolution DEMs // *Geomorphology*. — 2004. — Vol. 63. — P. 159–173.
10. **Buccolini M., Cocco L., Cappadonia C., Rotigliano E.** Relationships between a new slope morphometric index and calanchi erosion in northern Sicily, Italy [Электронный ресурс]. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12000335> (дата обращения 17.11.2018).
11. **Oguchi T.** Drainage density and relative relief in humid steep mountains with frequent slope failure // *Earth Surf. Process. Landf.* — 1997. — Vol. 22. — P. 107–120.
12. **Куликова М.П., Ондар У.В., Ооржак У.С.** Комплексное исследование загрязненности мышьяком природных объектов в районе комбината Тувакобальт // *Экология и промышленность России*. — 2012. — № 3. — С. 50–52.
13. **Лебедев В.И.** Арсенидное кобальтовое месторождение Хову-Аксы: проблемы возрождения уникального кобальтового производства в Туве // *Уникальные исследования XXI века*. — 2015. — № 3. — С. 15–25.
14. **Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю.** Структурный анализ типов функционирования и эволюции речных бассейнов // *Гидрология и геоморфология речных систем: Материалы конф.* — Иркутск: Изд-во СО РАН, 1997. — С. 44–52.
15. **Геологическая карта СССР. М-46-Х. М-6 1:200 000. Сер. Западно-Саянская / Под ред. В.Г. Богомолова.** — М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по геологии и охране недр, 1961. — 1 л.
16. **Философов В.П.** Порядки долин и их использование при геологических исследованиях // *Науч. ежегод. Саратов. ун-та за 1955 г.* — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1959. — С. 38–40.
17. **Симонов Ю.Г.** Избранные труды (к 85-летию со дня рождения). — М.: Изд-во ООО «Ритм», 2008. — 384 с.
18. **ГОСТ 31861-2012.** Вода. Общие требования к отбору проб. — М.: Стандартинформ, 2013. — 60 с.
19. **СанПиН 2.1.4.1074–01.** Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения: Пост. № 24 от 26.09.2001 г. с изм. 28.06.2010 г. [Электронный ресурс]. — <https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9742/> (дата обращения 17.11.2018).

Поступила в редакцию 09.04.2019

После доработки 28.01.2020

Принята к публикации 25.09.2020