

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОЛОВА В АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНАХ ЯКУТИИ

В. Н. Макаров

Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (Якутск, Российская Федерация)

Для цитирования

Макаров В. Н. Формирование техногенных гидрохимических потоков при разработке месторождений олова в арктических районах Якутии // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 549—561. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-549-561.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2024 г.

Анализируются результаты изучения техногенных гидрохимических потоков рассеяния, возникающих при разработке рудных и россыпных месторождений олова в арктических районах северо-востока Якутии. За полярным кругом находится большинство крупных оловянных объектов: коренных (Депутатское, Дьяхтардахское, Кестер, Улахан-Эгеляхское, Чурпунья, Эге-Хая) и россыпных (Смольникова, Тасаппа, Тирехтях, Чокурдахская) месторождения. Отработка месторождений олова приводит к резкому изменению химического состава природных вод и формированию протяженных техногенных гидрохимических потоков, отрицательно влияющих на экосистемы. Загрязнение природных вод при отработке месторождений олова связано с аномальной концентрацией минеральных взвесей, сульфатов, водорода, железа, алюминия, марганца, меди, цинка, свинца, мышьяка, ртути.

Ключевые слова: аномалии, Арктическая зона Республики Саха (Якутия), водная среда, воздействие на окружающую среду, гидрохимические аномалии, горнодобывающая промышленность, загрязнение речных вод, многолетнемерзлые породы (ММП), олово.

Введение

В России олово входит в перечень стратегических видов минерального сырья и относится к полезным ископаемым первой группы, сырьевая база которых достаточна для обеспечения потребностей экономики [1].

Традиционно олово используется как безопасное, нетоксичное, коррозионностойкое покрытие в чистом виде или в сплавах с другими металлами. Значительные количества этого металла используются производителями химикатов (18%) и белой жести (12%), а также свинцово-кислотных аккумуляторов, бронз и латуней, флотат-стекла и др. В последнее десятилетие олово стало востребованным индустрией высоких технологий и приобрело совершенно новые перспективы, связанные с ускоренным развитием производств электроники, электротехники, химии, сложного машиностроения. Расширяющийся спрос на продукцию IT-индустрии стал основным мотивом роста интереса к олову [2]. Очевидным следствием влияния фундаментальных факторов спроса и пред-

ложения стал непрерывный взрывной рост цен на олово, в мае 2024 г. превысивших отметку 33 тыс. долл./т.

В перспективе ожидается устойчивый рост спроса на металлическое олово. Его возможные темпы International Tin Association (ITA) оценивает в 3—6% в год. Этот рост будет обеспечен такими направлениями использования металла, как электроника, коммуникации, IT-технологии, возобновляемая энергетика и электротранспорт. Причем эксперты ITA ожидают, что к 2025 г. на рынке олова сформируется дефицит в размере 30—40 тыс. т, и в последующие годы он может увеличиться [3; 4].

Доля России в глобальных запасах олова, сконцентрированных на востоке страны, составляет не менее 7% мировых (пятое место в мире). Республика Саха (Якутия) располагает самой крупной и высококачественной сырьевой базой олова, доля которой составляет 36% общероссийской [5].

Растущий спрос на олово и рост цен на него определяют перспективы возрождения оловодобывающей промышленности в стране, в первую очередь на

Таблица 1. Основные месторождения олова в Северо-Янском оловоносном районе [7]

Table 1. Main tin deposits in the North-Yansky tin-bearing region [7]

| Месторождение | Тип месторождения | Запасы (А+В+С ₁) на 01.01.21, тыс. т | Доля в запасах России, % | Содержание |
|--|-----------------------|--|--------------------------|-------------------------|
| <i>Подготовленные к эксплуатации и разведываемые</i> | | | | |
| Депутатское | Касситерит силикатный | 198,3 | 12,1 | 1,15% |
| Тирехтях | Касситерит россыпной | 65,9 | 3,2 | 959,22 г/м ³ |
| <i>Нераспределенный фонд недр</i> | | | | |
| Одинокое | Касситерит-кварцевый | 125,8 | 6,0 | 0,32% |
| Одинокий | Касситерит россыпной | 50,9 | 2,5 | 828,71 г/м ³ |
| Чокурдах | Касситерит россыпной | 18,2 | 0,9 | 492,97 г/м ³ |

богатых месторождениях Якутии. Для всех способов разработки месторождений олова характерно высокое воздействие на биосферу.

Цель настоящей статьи — обобщить и проанализировать имеющуюся информацию о техногенном воздействии отработки месторождений олова на формирование гидрохимических аномалий, дать оценку вероятной геоэкологической опасности для водных систем при активной отработке месторождений олова в Арктической зоне Якутии. Экологические проблемы — важные факторы, тормозящие строительство новых рудников как в отечественной, так и в зарубежной Арктике [6]. Данная публикация обобщает результаты многолетних геохимических исследований на месторождениях олова в Арктической зоне Якутии. Знание вероятной опасности загрязнения водных систем при добыче олова в арктическом регионе позволит определить необходимый комплекс природоохранных и компенсирующих мероприятий при возрождении оловодобывающей промышленности в регионе.

Объекты и методы исследования

Общие сведения о районах исследования

В Арктической зоне России сосредоточена крупнейшая минерально-сырьевая база олова в мире. Доля российского олова в арктических запасах планеты составляет 100%, а в запасах страны — около 50%. Известны два уникальных оловорудно-россыпных района: Северо-Янский в Республике Саха (Якутия) и Пырканайский в Чукотском автономном округе. В 1990-х годах добыча олова из рудных месторождений и россыпей в этих районах превышала 10 тыс. т в год [7]. В настоящее время добыча прекращена по экономическим причинам.

Основные месторождения олова сосредоточены в восточном секторе Арктической зоны на востоке и северо-востоке республики в Северо-Янском оловоносном районе, где находится 50% российских запасов и ресурсов олова. В Якутии к настоящему времени известно 114 собственно оловянных объектов, в том числе 9 коренных и 6 россыпных место-

рождений, большинство которых находится за полярным кругом: рудные — Чурпунья, Депутатское, Дьяхтардахское, Одинокое, Эге-Хая, Кестер, Улахан-Эгеляхское; россыпные — Чокурдахская, Смольникова, Одинокое, Тасаппа, Тирехтях. Большинство месторождений олова, преимущественно касситерит-силикатных и касситерит-кварцевых, числится в нераспределенном фонде недр [5].

Большая часть запасов олова (около 76%) содержится в коренных объектах. В крупнейшем в стране Депутатском месторождении с богатыми касситерит-турмалиновыми рудами содержится 12,1% запасов России, среднее содержание олова — 1,15% [7]. Среди россыпей выделяются две уникальные — ручьев Тирехтях и Одинокий, запасы каждой из которых превышают 50 тыс. т металла при содержании олова в песках более 800 г/м³. Каждая из них по количеству заключенного в них металла сопоставима с крупными коренными месторождениями (табл. 1).

Горнодобывающие и горно-обогащительные предприятия являются одними из наиболее сильных загрязнителей окружающей среды, что связано с целым комплексом факторов отработки наряду с тем, что месторождения сами являются природными загрязнителями, что неизбежно при технологических процессах их разведки и эксплуатации. К таким факторам относятся: дефляция и размыв отвалов и хвостохранилищ, стоки водоотлива из подземных и поверхностных горных выработок, стоки обогащительных фабрик после очистки сооружений, рассеяние рудного материала при транспортировке, организованные и неорганизованные выбросы в процессе обогащения. Ведущими факторами, определяющими специфику развития природных комплексов в Якутии, являются суровый резко континентальный климат и повсеместное развитие многолетнемерзлых пород [8].

Значительная химическая нагрузка на водные и наземные экосистемы месторождений олова в регионе определяется особенностями регионального геохимического фона, составом добываемого сырья и вмещающих пород, таликовых зон, высокой способностью мерзлых пород к пылеобразованию.

Основными географическими факторами, отрицательно влияющими на преобразование экосистем криолитозоны в районах месторождений, являются широтно-климатические (низкая температура, высокая повторяемость безветренных дней, туманы, относительно высокая плотность воздуха), высотно-поясные уровни и геофизиологические условия ландшафтов (льдиность отложений, температура горных пород, мощность сезонноталого слоя, наледи и другие мерзлотные процессы и явления).

Ко второй группе факторов, влияющих на последствия недропользования, относятся геологические и горнотехнические условия залегания месторождений, рельеф местности, глубина и мощность продуктивного слоя, угол наклона и формы рудного тела, содержание и физико-химические свойства полезного компонента и геохимический состав руд, эндогенных ореолов и вмещающих пород [9].

Значительная химическая нагрузка на водные и наземные экосистемы месторождений в арктических районах определяется особенностями регионального геохимического фона, составом добываемого сырья и перемещаемых в процессе техногенного преобразования ландшафтов вмещающих пород, способностью мерзлых пород к пылеобразованию.

Технологическими факторами воздействия на экосистемы являются способ и система разработки месторождений, применяемые технологии добычи и переработки сырья, комплекс основной и вспомогательной техники.

При разработке россыпных и рудных месторождений олова в регионе горнодобывающие комплексы включают мощную буровую, землеройную, транспортную и экскавационную технику. Применяемая технология сопровождается выделением значительного пылегазового потока, состоящего из загрязняющих природную среду пыли и газов (CO_2 , SO_2 , CH_4 , NO_x и др.), что увеличивает зону воздействия на территории, прилегающие к объектам недропользования.

Геохимические особенности региона определяются широким распространением юрских терригенно-осадочных отложений с подчиненным развитием эффузивов риолитового и андезитового состава. Менее распространены крупные массивы гранитов, диоритов, гранитоидов [10].

Гранитоиды и терригенные отложения (песчаники, сланцы) практически не отличаются по спектру накапливающихся микроэлементов (Bi, As, Cd, Sn, Cu, Ag) и различаются лишь уровнями их содержания. Состав концентрирующихся в горных породах химических элементов отражает металлогеническую специализацию региона, связанную прежде всего с месторождениями олова.

Оловорудные месторождения в регионе принадлежат к касситерит-пегматитовой, касситерит-кварцевой, касситерит-силикатной, касситерит-сульфидной формациям и формации оловоносных скарнов. Основное значение среди них по количеству месторождений и проявлений, а также по объему запасов

и ресурсов имеют касситерит-силикатная и касситерит-кварцевая формации, подчиненное — касситерит-сульфидная. Основные минералы олова и сопутствующих минералов в основном обладают в гипергенных условиях химической стойкостью и дают продукты выветривания преимущественно в твердой фазе, поэтому ведущую роль в образовании вторичных литохимических ореолов и потоков рассеяния играют процессы механического переноса.

Запасы, связанные с касситерит-кварцевым оруденением, преимущественно заключены в штокверках, которые достаточно однородны по содержанию олова (от 0,09% до 0,32%). К таким объектам относится Одинокое месторождение. Месторождения касситерит-кварцевой формации локализируются в виде пологих жил в контракционных трещинах, крутопадающих жил в трещинах складывания в эндо- или экзоконтактных зонах массивов гранитоидов. Встречаются штокверковые зоны. Общей чертой минерального состава месторождений является резкое преобладание литофильных минералов — кварца, полевых шпатов, мусковита и топаза над силикатами железа и сульфидами при подчиненном значении карбонатов (встречается кальцит) и отсутствии окислов железа и сульфосолей. Минеральный состав руд: главные — кварц, топаз, сидерофилит; второстепенные — мусковит (серицит), каолинит, флюорит, гематит, касситерит, пиромазит; в виде примесей отмечаются молибденит, вольфрамит, арсенопирит, пирит, халькопирит, сфалерит, станнин, галенит, рутил, циркон и др.

Касситерит-силикатное оруденение в основном заключено в жилах и минерализованных зонах и в целом характеризуется сравнительно высоким содержанием олова: при вариациях от 0,15% до более 5% оно в среднем по всем объектам составляет 0,73%. В числе объектов этого типа — Депутатское месторождение богатых касситерит-турмалиновых руд, входящее в десятку лучших мировых объектов. Рудное поле месторождения сложено мощной терригенной толщей песчаников с прослоями-ритмами глинистых алевролитов-алевропесчаников. Рудные тела морфологически представлены минерализованными зонами дробления, жилами выполнения, зонами прожилкования с выклинивающимися и дугowymi апофизами. Мощность не выдержанна и изменяется в пределах от 0,3 до 4,5 м с небольшими раздувами. Состав первичных руд — сульфиды, кварц, хлорит, турмалин, метаморфизованные осколки вмещающих пород [11]. Западный участок Депутатского оловорудного месторождения (рис. 1) вскрыт штольнями Вентиляционная, Капитальная, Вскрывающая и вентиляционно-вспомогательным стволом.

К настоящему времени в результате предшествующих горно-геологических работ серьезно преобразованию подвержено около 75% площади. Степень последствий воздействия на природную среду при отработке месторождения оценивается как умеренная [9]. Категория объекта по степени



Рис. 1. Участок «Западный» оловорудного месторождения Депутатское [12]
Fig. 1. The “Zapadny” section of the Deputatsky tin ore deposit [12]

последствий разработки на данной стадии призна на умеренно опасной, с началом отработки — опасной, а при аварийных ситуациях может стать особо опасной.

Большинство россыпных месторождений олова отрабатываются открытым способом с бульдозерной технологией вскрыши и добычи.

Разработка оловоносных россыпных месторождений в Арктической зоне привела к значительной деградации экосистем и образованию локальных природно-техногенных комплексов, основной особенностью которых является бурное развитие термоэрозийных явлений при разрушении почвенно-растительного слоя на всех стадиях горного производства, что объясняется наличием порового льда и ледяных жил (повторно-жильных льдов) во вмещающих породах. Наиболее серьезные изменения происходят в почвенно-растительном покрове и в химическом составе водных объектов. Это требует минимизации термоэрозийных процессов, связанных с наличием ледяных жил в бортах горных выработок, карьеров и рекультивация отвалов пустых пород.

Ряд россыпных месторождений олова (Западная россыпь и Тиряхтах) разрабатывался подземным способом, при котором техногенные преобразования ландшафтов ограничиваются пределами горного отвода и выражаются обустройством промышленной площадки. Интенсивность и объем выбросов при этом в десятки и сотни раз меньше по сравнению с открытыми разработками.

Отработка рудных и россыпных месторождений олова связана с извлечением на поверхность больших масс горных пород, оборотных технических вод, эксплуатацией хвостохранилищ. Процессы техноге-

неза сопровождаются активизацией физико-химических и биогеохимических процессов и приводят к резкому изменению химического состава природных вод и формированию протяженных техногенных лито- и гидрохимических потоков в речной сети, отрицательно влияющих на экосистемы.

Основную роль в гипергенном преобразовании и рассеянии на месторождениях, в том числе и большого числа загрязняющих компонентов, играют продукты окисления пирита и сульфидов тяжелых металлов, содержащихся в продуктивных пластах и перекрывающих осадочных отложениях, а также сернокислотное выщелачивание алюмосиликатов и карбонатов. Эти процессы происходят и в отвалах пустых пород. Окисление перечисленных минералов возрастает с увеличением размеров зоны аэрации и площади отвалов пустых пород на поверхности.

Материал россыпей уже прошел переработку в зоне гипергенеза, неустойчивые минералы (в первую очередь сульфиды) в значительной степени переработаны, поэтому загрязнение среды при эксплуатации россыпей носит преимущественно механический характер, определяемый высокой мутностью водотоков, а также вторичный химический характер при преобразовании техногенных осадков.

Методы исследований

В основу статьи положены результаты обобщения геохимических исследований на месторождениях олова в Арктической зоне Якутии с 1990 по 2023 гг. При рассеянии химических элементов, поступающих от рудных тел и россыпей олова, в окружающей среде образуются геохимические ореолы и потоки рассеяния: техногенные геохимические аномалии, или

Таблица 2. Состав и параметры вторичных геохимических аномалий на оловорудных месторождениях
Table 2. Composition and parameters of secondary geochemical anomalies at tin ore deposits

| Рудная формация | Литохимические ореолы | Литохимические потоки | Гидрохимические потоки |
|-------------------------------------|---|--|--|
| Касситерит-кварцевая (Одинокое) | Sn, Mo, Cu, Ag, Zn, Co | Sn, Co, Zn, Pb, P, Ti, Cu, As | Sn, Li, As, Bi, Ag, Be, P |
| | Ореолы в сотни раз превышают размеры выходов рудных тел | Протяженность потоков до 2 км | Протяженность потоков n км * |
| Касситерит-силикатная (Депутатское) | Sn, Mo, Cu, Pb, Zn | Sn, Mn, Cu, Pb, Zn, Co, Ni | Sn, As, B, F, Pb, Zn, Cu, Hg, SO_4^{2-} , pH |
| | Ореолы в десятки раз превышают размеры выходов рудных тел | Протяженность потоков от 2—3 до 6—7 км | Протяженность потоков до 1 км |

* $n = 1—10$ км.

«зоны техногенного загрязнения», которые являются аналогами вторичных ореолов и потоков рассеяния, формирующихся в районе месторождений. Это позволяет применять для выявления техногенных геохимических аномалий методы и методические приемы поисковой геохимии.

Комплексные геохимические исследования в районах рудных и россыпных месторождений олова включали литохимическое и гидрогеохимическое изучение вторичных ореолов и потоков рассеяния в арктических районах в соответствии с [12; 13].

Аналитическая обработка геохимических проб проведена в лаборатории Института мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (ИМЗ СО РАН) и в Центральной геологической лаборатории (ЦГЛ) ГУГПП «Якутскгеология». Содержание химических элементов в почвах, донных отложениях и водах изучалось химическими, спектральными и атомно-абсорбционными методами анализа.

Все определения проводились по методикам, включенным в Государственный реестр методик количественного химического анализа.

Химический анализ воды проведен в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л. Ю. Бойцова и О. В. Шепелева). В воде определялось содержание макро- и мезокомпонентов SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; микроэлементов Cs, Li, Sr, Ba, F, P; измерялись pH, Eh и электропроводность.

Литохимические пробы (почвы, грунты) анализировались в ЦГЛ «Якутскгеологии». Там проведен приближенно-количественный атомно-эмиссионный спектральный анализ микроэлементного состава литохимических проб на 35 элементов и анализ на ртуть методом атомно-абсорбционной ртутметрии (анализатор ртути РА-915).

Результаты исследований и обсуждение

Вторичный геохимический ореол представляет собой сравнительно локальную часть ландшафта, в пределах которой устанавливаются аномальные геохимические характеристики, обусловленные процессами гипергенного преобразования и распреде-

ления (перераспределения) химических элементов и их соединений, поставляемых источниками, не являющимися обязательным компонентом данного ландшафта. Источники могут быть как природными (рудные тела, их первичные ореолы, горные породы, по тем или иным причинам резко отличающиеся по свойствам от вмещающих пород), так и техногенными (выбросы, отходы или стоки промышленных предприятий, средства химизации, бытовые отходы и т. п.).

Комплекс химических элементов, концентрирующихся в зоне гипергенеза рудных месторождений олова и формирующих геохимические аномалии во вторичных литохимических ореолах (почво-грунтах) и потоках рассеяния (донных осадках), гидрохимических потоках (природных водах), представлен в табл. 2.

Химический состав донных отложений определяется геохимическими особенностями горных пород, распространенных на водосборах, составом эндогенных и гипергенных аномалий рудных тел. Они обогащены химическими элементами, типоморфными для месторождений и накапливающимися в горных породах, — Sn, Co, Zn, Pb, P, Ti, Cu, As (табл. 3).

Поверхностные воды (реки, озера) в регионе очень пресные с минерализацией 30—40 мг/л, гидрокарбонатные смешанные по составу катионов. Характерной особенностью химического состава фоновых вод в пределах терригенных и гранитоидных формаций является сравнительно высокое содержание сульфат-иона (река Селенных — 3 мг/л, река Хрома — 8 мг/л), отражающее насыщенность сульфидами горных пород. Соотношение анионов в составе фоновых речных вод — $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$, катионов — $Ca^{2+} > Na^+$, $Mg^{2+} > K^+$ [13].

В формировании химического состава поверхностных и надмерзлотных вод преобладающая роль принадлежит атмосферным осадкам, которые вносят около 30—40% солей в речные воды. Дождевые воды частично просачиваются в горные породы до кровли многолетней мерзлоты, насыщая сезонно-талый слой, а в основном стекают по поверхности в пониженные участки рельефа, реки и озера.

Таблица 3. Содержание микроэлементов в донных отложениях литохимических потоков на участках горных работ месторождений олова, мг/кг

Table 3. Content of microelements in bottom sediments of lithochemical flows at mining sites of tin deposits, mg/kg

| Элемент | Месторождения олова | | | | | | | | | | ПДК [12] |
|---------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|----------|
| | Мамонт | | Тенкели | | Озерный | | Омчикандя | | Депутатский | | |
| | C _{средн} | C _{макс} | C _{средн} | C _{макс} | C _{средн} | C _{макс} | C _{средн} | C _{макс} | C _{средн} | C _{макс} | |
| Li | < 5 | 50 | < 5 | 50 | < 5 | 50 | < 5 | 40 | 30 | 50 | 50—100 |
| Be | — | < 3 | — | < 3 | — | < 3 | < 3 | 3 | < 3 | 20 | — |
| B | 25 | 30 | 25 | 30 | 30 | 100 | 60 | 70 | 90 | 100 | — |
| P | 700 | 1000 | 700 | 1000 | 700 | 1000 | 700 | 1000 | 700 | 1000 | — |
| Ti | 6000 | 7000 | 4000 | 10000 | 7000 | 10000 | 5000 | 5000 | 2000 | 5000 | 5000 |
| V | 70 | 100 | 40 | 70 | 80 | 100 | 20 | 20 | 20 | 50 | 150 |
| Cr | 50 | 50 | 60 | 70 | 70 | 70 | 30 | 40 | 20 | 30 | 100 |
| Mn | 800 | 1000 | 700 | 1000 | 800 | 1000 | 700 | 700 | 700 | 700 | 1500 |
| Co | 10 | 10 | 5 | 7 | 10 | 15 | 6 | 8 | 2 | 6 | 50 |
| Ni | 20 | 20 | 20 | 20 | 30 | 30 | 10 | 12 | 7 | 15 | 85 |
| Cu | 30 | 50 | 50 | 70 | 50 | 50 | 30 | 50 | 200 | 200 | 33 |
| Zn | 100 | 150 | 200 | 200 | 150 | 200 | 250 | 400 | 600 | 700 | 55 |
| Ga | < 5 | 20 | < 5 | 20 | < 5 | 20 | < 5 | 15 | 10 | 20 | — |
| Ge | < 0,5 | 1,5 | 1,5 | 2 | 1,5 | 2 | < 0,5 | 1,5 | < 0,5 | 1,5 | — |
| As | < 5 | 10 | < 5 | 30 | < 5 | 4 | < 5 | 30 | 150 | 1000 | 2—10 |
| Y | 50 | 70 | 30 | 50 | 35 | 50 | 30 | 30 | 5 | 30 | — |
| Nb | < 5 | 20 | 15 | 20 | < 5 | 20 | 12 | 15 | 15 | 20 | — |
| Mo | 2 | 7 | 0,1 | 2 | 0,1 | 2 | 1,2 | 1,5 | 1,5 | 2 | 5 |
| Ag | 0,05 | 0,2 | 0,5 | 0,7 | 0,05 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,6 | 1,5 | — |
| Sn | 3 | 5 | 10 | 15 | 5 | 300 | 8 | 40 | 500 | 2000 | 50 |
| La | — | < 10 | — | < 10 | 30 | 50 | — | < 10 | — | < 10 | — |
| Yb | < 3 | 5 | < 3 | 5 | < 3 | 5 | < 3 | 5 | < 3 | 5 | — |
| W | < 3 | 3 | 5 | 7 | < 3 | 7 | 6 | 7,5 | 10 | 20 | — |
| Pb | 10 | 20 | 15 | 50 | 27 | 30 | 15 | 40 | 50 | 150 | 32 |
| Bi | — | < 0,5 | 1 | 1,5 | < 0,5 | 1 | 3 | 3,5 | 2 | 15 | — |
| Hg | 0,020 | 0,030 | 0,010 | 0,018 | 0,030 | 0,038 | — | — | 0,046 | — | 2,1 |

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК_{почв}.

Note. Values exceeding the maximum permissible soil concentration are highlighted in bold.

Содержания микрокомпонентов в фоновых водах района незначительны и не превышают 5—10 мг/л.

Общей чертой гидрогеохимии оловорудных месторождений является формирование вокруг них слабокислых и кислых, иногда очень кислых есте-

ственных гидрогеохимических полей с высокими концентрациями сульфатов и присутствием в солевом составе рудных элементов [14].

Наблюдается специфика распространения в водах оловорудных месторождений аномалий рудных,

преимущественно халькофильных и литофильных групп химических элементов.

Группа литофильных элементов Ti, V, Ga, Al, Be и др. тяготеет к участкам высокотемпературной гидротермальной проработки горных пород. Гидрогеохимические аномалии оловорудных месторождений отражают геохимические особенности месторождений: касситерит-кварцевые (Sn, Mo, Zn, Cu, Pb, As, SO_4^{2-}), касситерит-сульфидные (Sn, Bi, Sb, Ag, Mn, Zn, Cu, Pb, As, SO_4^{2-}), редкометалльные (Sn, Li, As, Bi, Ag, Be, P).

Внешние контуры гидрогеохимических полей фиксируются по аномальным концентрациям сульфатов, ртути, олова, фтора. Размеры полей сульфатов колеблются от 1—2 до первых десятков квадратных километров, 20 км² на Депутатском рудном поле (рис. 2).

Параметры гидрогеохимических аномалий ртути примерно равнозначны. В поверхностных водах концентрации сульфатов достигают первых граммов в литре, меди и фтора — n мг/л, ртути, олова, вольфрама — $0,0n$ мг/л ($n = 1—10$). В надмерзлотных водах содержание рудных элементов еще выше, однако параметры аномалий менее значительны.

На отдельных месторождениях в результате процессов криогенеза в надмерзлотных водах формируются сульфатные криопэги. Величина сухого остатка этих вод достигает 250 г/л, а в составе микроэлементов обнаружены аномальные концентрации Cu, Sn, As, Ag, Pb, Cd, Be, Nb, Ta, Li, Hg.

Повышенная сульфатность характерна и для подмерзлотных вод, вскрытых скважинами в пределах рудных полей на глубинах 200—600 м. В составе подмерзлотных вод наблюдается обширный комплекс тяжелых металлов: Sn, As, Cu, Ag, Pb, Zn, Ni, типоморфных составу рудных тел [14].

Отработка месторождений олова связана с извлечением на поверхность больших масс пустых пород и оборотных технических вод, с эксплуатацией их накопителей. Это приводит к высокой техногенной нагрузке на водные системы, попадающие в зону антропогенного воздействия. Естественная мутность вод водотоков, составляющая около 0,1 г/л [13], ниже отработываемых россыпей олова, в период активной добычи увеличивалась на несколько порядков (россыпь Хаханнах, июнь 1982 г. — 4091 мг/л). Аномальное количество минеральных взвесей, поступающих в водные системы под влиянием горных работ, зависит от объемов и площади нарушенных земель на месторождениях и заметно даже на расстоянии 10—20 км от приисков в устьевых частях рек, дренирующих месторождения (Силир, Тенкели, Буор-Юрях и др.). В техногенных водных системах резко меняется соотношение взвешенных и растворимых форм вещества. Если в естественных водотоках преобладают взвешенные формы, соотносящиеся с растворимыми как 3:1, то в зонах техногенного воздействия преобладание минеральных взвесей становится абсолютным, а на долю растворимого стока приходится менее 1% мигрирующего вещества. Различные тонкоизмельченные минералы в техногенных взвесах образуют устойчивую слабо осаждающуюся в воде

муть, загрязняющую водотоки на большом протяжении. В 1980-е годы во время активной отработки россыпей олова (Смольникова, Тенкели, Суор, Озерный, Крайний и др.) взвешенные вещества засорили реку Хрому на протяжении до 500 км [9; 14].

Взвешенные осадки техногенных водотоков содержат широкий комплекс химических элементов, типоморфных для рудных тел и продуктивных на россыпи горизонтов. В большинстве случаев содержание тяжелых металлов в минеральных взвесах возрастает в 2—3 раза, однако их общее количество в системе вода-взвесь увеличивается на 1—2 порядка. Например, если суммарное содержание растворенной и взвешенной меди в фоновых водотоках составляет 0,1—0,2 мг/л, то ниже месторождений оно достигает 9,4 мг/л (река Хаханнах, ниже россыпи Озерной) и 6—13 мг/л (река Тенкели, ниже россыпи Тенкели).

Наблюдается отчетливая зависимость содержания минеральных взвесей в техногенных водных системах от площади нарушенных земель на месторождениях (рис. 3).

Активизация физико-химических и биогеохимических процессов, связанная с поступлением в зону гипергенеза больших масс рудного главным образом сульфидного материала, тонкодисперсных льдистых осадков, приводит к повышению концентрации ряда компонентов в составе минеральных взвесей, природных вод и донных отложений. Как правило, качественные и количественные резкие изменения водных систем, особенно химического состава воды, наблюдаются в непосредственной близости от зоны техногенеза, но типоморфные микроэлементы-загрязнители во взвешенной форме могут мигрировать на десятки километров.

Состав речных вод является индикатором техногенных процессов, происходящих в долине и на водоразделах и сказывающихся на геохимическом состоянии среды и ее экосистем. Виды и объемы геохимической трансформации состава речных вод, обусловленных техногенными причинами, определяются характером источника загрязнения. Изменения химического состава природных вод под влиянием горнорудных предприятий происходят в основном в результате сбросов жидких, твердых и газообразных отходов предприятиями горнодобывающей промышленности района за счет выщелачивания отвалов, разрушения стенок карьера и др.

Отработка месторождений олова ведется шахтным и карьерным способами и связана с извлечением на поверхность больших масс пустых горных пород, откачкой дренажных вод, эксплуатацией их накопителей, хвостохранилищ. При аварийных ситуациях на хвостохранилищах горнообогатительных комбинатов (ГОК) рудных месторождений в окружающую среду поступает широкий комплекс химических элементов, в том числе и высокотоксичных, таких как Cu, Zn, Pb, Bi, Hg, As.

Карьеры отдельных месторождений занимают площадь до 1 км², большие площади отводятся под

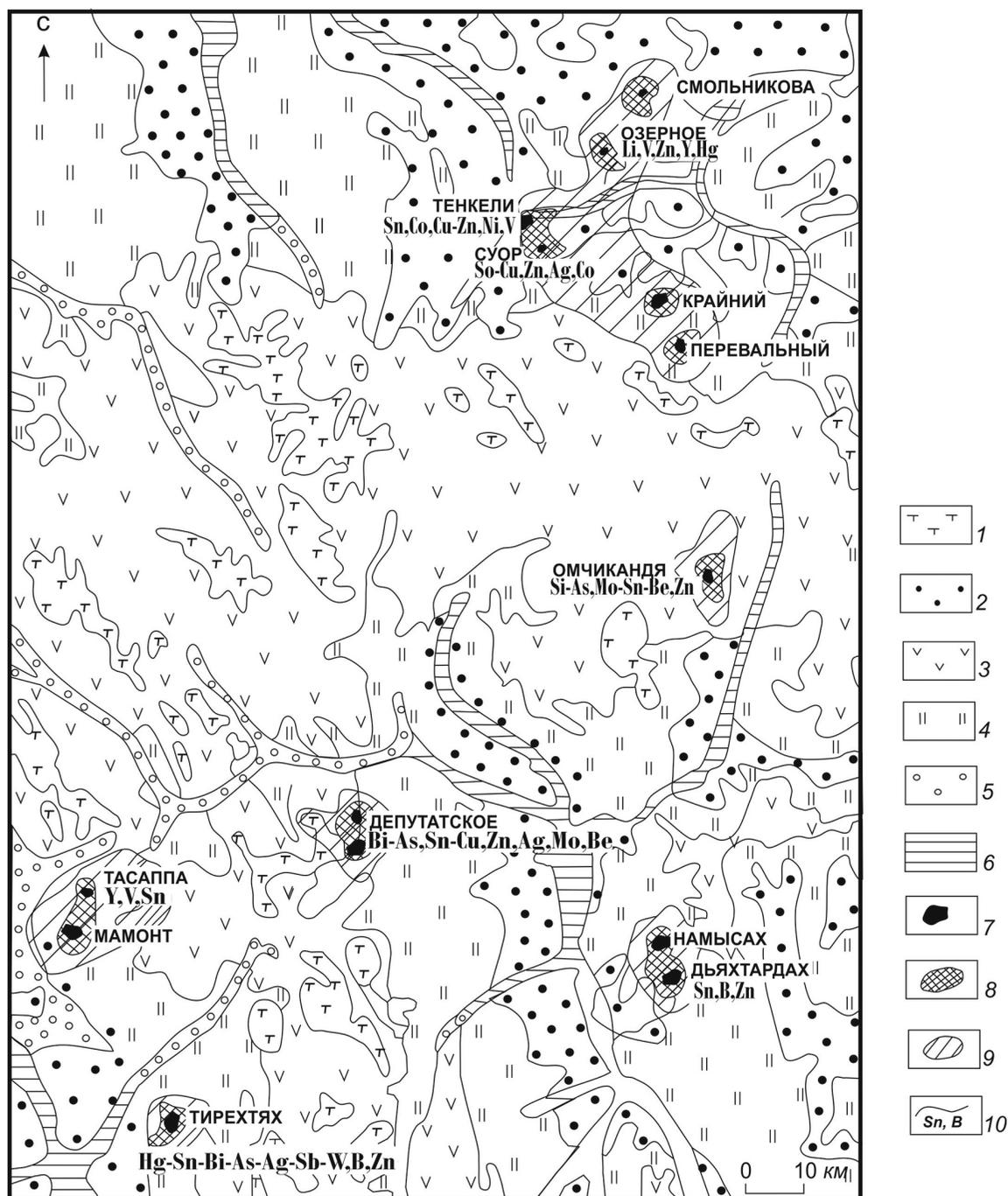


Рис. 2. Геохимические аномалии и нарушенность ландшафтов Деputатского горнопромышленного узла [9]. Типы ландшафтов: 1 – горно-приповерхностный, 2 – плоскогорно-привершинный, 3 – горно-склоновый, 4 – межаласный, 5 – горно-долинный, 6 – мелкодлинный; 7–9 – зоны различной степени техногенной нарушенности (7 – катастрофической, 8 – значительной, 9 – умеренной), 10 – аномальные геохимические потоки рассеяния

Fig. 2. Geochemical anomalies and landscape disturbances of the Deputatskiy mining and industrial hub [9]. Landscape types: 1 – mountain-surface, 2 – plateau-summit, 3 – mountain-slope, 4 – inter-alas, 5 – mountain-valley, 6 – shallow-valley, 7–9 – zones of various degree of technogenic disturbance (7 – catastrophic, 8 – significant, 9 – moderate), 10 – anomalous geochemical dispersion flows

хвостохранилища, и общая площадь нарушенных земель, например, на Деputатском ГОК составляет около 4,9 тыс. га (см. рис. 2).

Природную гидрогеохимическую обстановку изменяют техногенные процессы: увеличение инфильтрационного питания за счет поступления из нако-

пителей карьерных вод и жидкой фазы пульпы из хвостохранилищ, из атмосферных осадков, поверхностных вод вследствие инверсии режима поверхностных водоемов и водотоков (превращения их из естественных дрен в источники питания), загрязнение поверхностных вод атмосферными осадками,

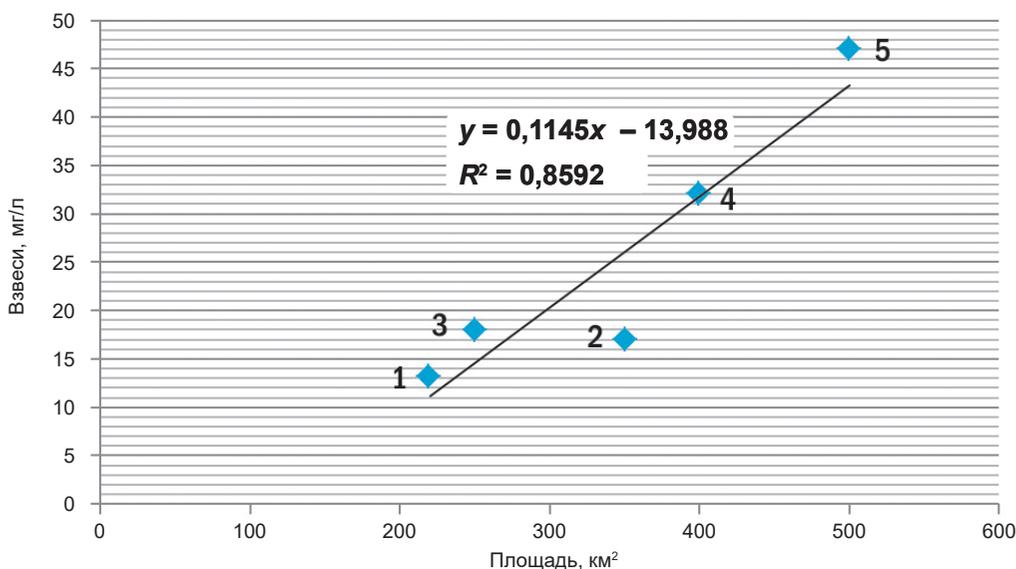


Рис. 3. Соотношение площади нарушенных земель и содержания минеральных взвесей в устьях рек, дренирующих месторождения (река/месторождение): 1 – Хаханнах (Озерный), 2 – Тенкели (Тенкели), 3 – Буор-Юрях (Суор), 4 – Силир (Смольникова), 5 – Артык (Крайний, Перевальный)

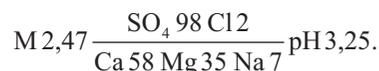
Fig. 3. Ratio of the area of disturbed lands and the content of mineral suspensions at the mouths of rivers draining the deposits (river/deposit): 1 – Khakhanakh/Ozerniy, 2 – Tenkeli/Tenkeli, 3 – Buor-Yuryakh/Suor, 4 – Silir/Smolnikova, 5 – Artyk/Krainiy, Perevalny

содержащими продукты выщелачивания отвалов пустых пород, карьерными водами, откачиваемыми в накопители, поверхностные водотоки и водоемы, сточными водами [15].

Большинство сооружений, ограждающих накопители и хвостохранилища, пропускают техногенные растворы. Поступление техногенных вод из накопителей и хвостохранилищ формирует контрастные техногенные гидрогеохимические аномалии в ручьях и даже реках (Иргичян), расположенных ниже по течению.

Большие объемы загрязненных стоков попадают в водные системы при катастрофических паводках. Например, на Депутатском ГОК в 2007 г. с 22 мая по 4 июня объем сброса составил 202 тыс. м³, в 2008 г. с 6 по 13 июня было сброшено 103 тыс. м³ паводковой воды, что в 200—300 раз превышает пропускную способность сифонного водосброса (около 600 м³/ч).

Воды ручьев, расположенных ниже разрабатываемых месторождений Депутатского рудного поля, представляют собой типичные «рудные» воды с преобладанием сульфатов в солевом составе и высокой концентрацией тяжелых металлов. Это очень агрессивные кислые воды с величиной pH 2,5—3,5 и повышенной минерализацией. Высокая кислотность и насыщенность природных вод сульфатами и тяжелыми металлами наблюдается практически на всем протяжении реки Депутатки. Химический состав ее воды ниже хвостохранилища Депутатской обогатительной фабрики (ДОФ) сульфатный магниевый-кальциевый сильноокислый (pH = 3,25), величина минерализации около 2,5 г/л; формула Курлова:



Рудничные воды ДОФ частично сливаются через водоотводный туннель непосредственно в реку Иргичан. Нейтрализация технологических растворов малоэффективна, и через туннель в реку поступают практически неочищенные кислые стоки с pH = 2,6. В русле реки на 1,5 км ниже водоотвода рудничных вод фиксируется контрастная техногенная аномалия сульфатных вод; формула Курлова:



Сброс рудничных вод ДОФ в водную систему реки Иргичан приводит к ее загрязнению широкой гаммой микроэлементов. Однако благодаря щелочному геохимическому барьеру в воде реки тяжелые металлы удаляются из раствора и концентрируются в донных осадках. Например, зарегулированность стока приводит к определенному очищению реки ниже устойчивника и хвостохранилища такими загрязнителями, как Pb и As [15].

Загрязнение природных вод разрабатываемыми месторождениями олова в основном происходит в результате притока сульфатов, водорода, железа, алюминия, марганца, меди, цинка, свинца.

Поступление отмеченных ингредиентов приводит к изменению природной гидрогеохимической обстановки. Природные воды подвергаются полной техногенной метаморфизации с формированием кислых вод сульфатного типа. Вокруг разрабатываемого месторождения образуются зоны, различаю-

щиеся по окислительно-восстановительным и кислотно-щелочным условиям природных вод.

Первая зона — воды полной техногенной метаморфизации: кислые ($\text{pH} < 4\text{--}5$) сульфатные воды с аномальными содержаниями тяжелых металлов — цинка, меди, свинца, марганца и др.

Вторая зона — слабокислые сульфатно-гидрокарбонатные метаморфизованные воды также с высокими содержаниями тяжелых металлов. Техногенные воды этой зоны занимают промежуточное положение между природными слабоизмененными водами и полностью метаморфизованными техногенными растворами.

С удалением от зон интенсивного техногенного давления содержание макрокомпонентов, определяющих химический состав вод, снижается до уровня их значений в естественных водотоках и по химическому составу приближается к фоновому. Это третья зона. Следы техногенной метаморфизации сохраняются в аномальных концентрациях ртути, фтора и повышенном содержании сульфатов.

Техногенные осадки в водных системах служат вторичным источником образования гидрогеохимических аномалий. Загрязненные осадки накапливаются на участках уменьшения интенсивности поверхностного стока в приустьевой части долин, на участках меандрирования. В техногенных геохимических системах вода-осадок, вода-взвесь происходят растворение, гидролиз, ионообменные реакции, способствующие переходу химических элементов в раствор. Кроме того, уплотнение речных осадков ведет к переходу части химических элементов из поровых растворов в речные воды. Примером такой гидрогеохимической аномалии могут быть высокие концентрации марганца, меди и цинка в приустьевой части реки Хаханнах. Резкое уменьшение концентрации тяжелых металлов во взвесах сопровождается появлением контрастных аномалий в растворенных формах миграции. Подобные аномалии, ухудшавшие качество воды, были характерны и для основной водной системы — реки Хрома, принимавшей техногенные потоки загрязненных веществ из левых притоков, где велась отработка россыпей.

Контрастность техногенных гидрогеохимических аномалий на рудных (Zn , Cu , Mn , Co , Pb , La , SO_4) и россыпных (Mn , Cu , Cr) месторождениях олова достигает $100n$ и даже $1000n$ по отношению к фоновым концентрациям в природных водах.

Метаморфизованные техногенные воды с высоким содержанием токсичных элементов отрицательно влияют на санитарно-токсикологическое состояние водных систем. Концентрация ряда тяжелых металлов (Cu , Zn , Cr) в водотоках на участках горных работ может на два-три порядка превышать рыбохозяйственные ПДК [16], что делает их непригодными для хозяйственного использования.

Максимальное экологическое неблагополучие водных систем (вода + взвеси) характерно при добыче олова как на рудных, так и на россыпных месторождениях (Депутатское, Дьяхтардах, Тенкели,

Тасаппа, Мамонт), умеренное и низкое для объектов начальной стадии отработки (Одинокое, Черпунья) (табл. 4).

Отрицательные экологические последствия разработки месторождений олова имеют локальный характер по загрязнению атмосферы и литосферы, но являются региональными по уровню техногенного давления на водные системы.

Существующие нормативные документы по созданию горнодобывающих предприятий включают в себя процедуру оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС). Материалы ОВОС дают характеристику местоположения промышленной площадки рудника, климатические и ландшафтные характеристики, описание физико-географических, гидрологических и гидрогеологических условий, геологического строения района; приводят характеристики технологических процессов по отработке месторождения и проектные решения по охране окружающей среды (атмосферного воздуха, поверхностных вод, земельных ресурсов, недр) и по охране окружающей среды при складировании отходов. ОВОС включает все необходимые исходные данные для выполнения оценки степени воздействия производственной деятельности на окружающую природную среду и для определения экономического ущерба.

Необходимо учитывать главное различие россыпных и коренных месторождений в регионе: материал россыпей уже прошел переработку в зоне гипергенеза, неустойчивые минералы (в первую очередь сульфиды) в незначительной степени переработаны, поэтому загрязнение среды при эксплуатации россыпей носит преимущественно механический характер (высокая мутность стоков), также имеет место слабое вторичное химическое загрязнение ограниченным комплексом загрязнителей, поступающих из техногенных осадков.

В отличие от россыпей обогащаемые коренные руды как правило содержат сульфиды и другие неустойчивые минералы, которые инициируют химическое загрязнение. Большинство гидротехнических сооружений на рудных месторождениях, ограждающих накопители и хвостохранилища, пропускают техногенные растворы. Обогажительные предприятия на коренных объектах располагаются стационарно, что позволяет спроектировать и построить эффективную и экологически безопасную обогажительную схему, поэтому важно, чтобы часть экологических мероприятий была ориентирована на добросовестное выполнение уже существующих мер, предусмотренных ОВОС.

Заключение

Оловодобывающая отрасль в Арктической зоне Якутии характеризуется высокими запасами полезного ископаемого. Большинство крупных оловянных объектов Якутии, таких как коренные месторождения Чурпунья, Депутатское, Дьяхтардахское, Эге-Хая, Кестер, Улахан-Эгеляхское и россыпные месторождения Чокурдахская, Смольникова, Тасаппа,

Таблица 4. Классификация месторождений олова по степени экологического воздействия на водные системы

Table 4. Classification of tin deposits according to the degree of environmental impact on water systems

| Экологическое воздействие | Минеральные взвеси | | Природные воды | | |
|---------------------------|--|---------------------------------|---|---------------------------------|--|
| | Резкое возрастание объема стока | Геохимические аномалии | Трансформация химического состава | Геохимические аномалии | Высокая кислотность |
| Весьма высокое | Тенкели, Суор, Смольникова, Озерный, Перевальный | Депутатское, Тенкели, Укачилкан | Депутатское, Дьяхтардах | Депутатское, Тенкели, Укачилкан | Депутатское, Дьяхтардах, Тасаппа, Мамонт |
| Высокое | Тасаппа, Мамонт | Омчикандя, Черпунья | — | Дьяхтардах, Тасаппа, Мамонт | — |
| Умеренное | Одинокое, Черпунья | Суор | Тенкели, Суор, Тирехтях, Дорожный, Силир, Крайний, Озерный, Перевальный | Озерный, Черпунья | Черпунья |
| Низкое | — | — | Одинокое, Черпунья | — | — |

Тирехтях, располагаются за полярным кругом в экстремальных природных условиях. Резко континентальный климат, скудная растительность, суровые слабо изученные мерзлотные и геоэкологические характеристики существенно затрудняют освоение минеральных ресурсов.

В настоящее время добыча олова в регионе прекращена по экономическим причинам. Однако растущий спрос и устойчивый рост мировых цен на олово определяют перспективы возрождения оловодобывающей промышленности в Арктической зоне Якутии. Цена на олово за последние десять лет на Лондонской бирже металлов (London Metal Exchange, LME) увеличилась с 24 818 до 33 046 долл./т (по состоянию на 13 мая 2024 г.), т. е. почти на треть, а средняя цена олова с 1 января 1993 г. по 13 мая 2024 г. возросла на 27 484 долл./т (598%): было 5 562 долл./т, стало 33 046 долл./т.

В условиях быстрого истощения мировой сырьевой базы и высокой цены на олово возможен рост интереса к российским месторождениям олова со стороны зарубежных потребителей. Несмотря на сложные климатические и инфраструктурные условия, определенный инвестиционный интерес могут представлять крупные объекты (Депутатский, Тирехтях и др.) в границах Арктической зоны на севере Якутии.

Возрождение оловодобывающей промышленности в Арктической зоне Якутии приведет к осложнению экологической ситуации в регионе. Для всех способов разработки месторождений олова в Северо-Янском оловоносном районе характерно воздействие на биосферу, затрагивающее практически все ее элементы: водный и воздушный бассейны, землю, недра, растительный и животный мир.

Активизация физико-химических и биогеохимических процессов, связанная с поступлением в зону гипергенеза больших масс рудного, главным образом сульфидного материала, тонкодисперсных льдистых отложений (ледового комплекса), приводит к формированию контрастных и протяженных геохимических аномалий в природных водах.

Гидрохимические аномалии отражают геохимические особенности оловорудных месторождений: касситерит-кварцевые (Sn, Mo, Zn, Cu, Pb, As, SO_4^{2-}), касситерит-сульфидные (Sn, Bi, Sb, Ag, Mn, Zn, Cu, Pb, As, SO_4^{2-}), редкометалльные (Sn, Li, As, Bi, Ag, Be, P).

Метаморфизованные техногенные воды с высоким содержанием токсичных элементов отрицательно влияют на санитарно-токсикологическое состояние водных систем. Концентрация ряда тяжелых металлов (Cu, Zn, Cr) в водотоках на участках горных работ может на два-три порядка превышать рыбохозяйственные ПДК, что делает их непригодными для хозяйственного использования. Как правило, качественная и количественная трансформация водных систем, особенно химического состава воды, наблюдается в непосредственной близости от зоны техногенеза (до 1—2 км), но типоморфные микроэлементы-загрязнители во взвешенной форме могут мигрировать на десятки километров.

Возобновление активной добычи олова на рудных месторождениях и россыпях усилит техногенное давление на арктические экосистемы, в первую очередь на водные системы. Это обуславливает необходимость разработки и реализации системы природоохранных и компенсирующих мероприятий на основе имеющейся геохимической информации.

Важно соблюсти баланс между экологическими и экономическими интересами республики. Решение

о будущем оловодобывающей отрасли должно быть принято с учетом информации о геокриологических и геоэкологических условиях Яно-Индигорской оловоносной провинции. Создание и реализация системы природоохранных и компенсирующих мероприятий, горноэкологического мониторинга позволят эффективно добывать олово с минимальным ущербом для северных геосистем и способствовать возрождению оловодобывающей отрасли республики.

Финансирование

Исследования выполнены при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН (Проект СО РАН АААА-А20-120111690008-9).

Литература/References

1. Распоряжение Правительства РФ «Об основных видах стратегического минерального сырья» от 16 января 1996 г. № 50-р.
Order of the Government of the Russian Federation "On the main types of strategic mineral raw materials" dated January 16, 1996 no. 50-r. (In Russian).
2. Айкашев А. Н. Мировой рынок олова переживает ренессанс // Рос. внешнеэкон. вестн. — 2014. — № 1. — С. 82—93.
Aikashev A. N. The world tin market is experiencing a renaissance. Russian Foreign Economic Bulletin, 2014, no. 1, pp. 82—93. (In Russian).
3. Олово мира. — URL: <https://nedradv.ru/nedradv/ratings?rubric=0a8b7ef8e482110b22e0685d6c3b1c93>.
Tin of the world. Available at: <https://nedradv.ru/nedradv/ratings?rubric=0a8b7ef8e482110b22e0685d6c3b1c93>. (In Russian).
4. Перспективы добычи олова в России // YkTIMES.RU. — 2017. — 26 янв. — URL: <http://www.yktimes.ru>.
Prospects for tin mining in Russia. YkTIMES.RU, 2017, Jan. 26. Available at: <http://www.yktimes.ru>. (In Russian).
5. Состояние и пути повышения эффективности добычи олова в Республике Саха (Якутия). — Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2000. — 100 с.
Status and ways to increase the efficiency of tin mining in the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk, Publishing House YSC SB RAS, 2000, 100 p. (In Russian).
6. Лаломов А. В., Бочнева А. А., Чефранов Р. М., Чефранова А. В. Россыпные месторождения Арктической зоны России: современное состояние и пути развития минерально-сырьевой базы // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 2. — С. 66—77.
Lalomov A. V., Bochneva A. A., Chefranov R. M., Chefranova A. V. Placer deposits of the Arctic zone of Russia: current state and ways of developing the mineral resource base. Arctic: Ecology and Economy, 2015, no. 2, pp. 66—77. (In Russian).
7. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году». — М.: ВИМС, 2022. — 622 с.

State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021". Moscow, VIMS, 2022, 622 p. (In Russian).

8. Шац М. М., Макаров В. Н. Геоэкологические особенности недропользования в Восточной Сибири // Всероссийская конференция с международным участием «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне», посвященная 60-летию образования ИМЗ СО РАН (28—30.09.2020 г.). — Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН. — С. 204—207.
Shats M. M., Makarov V. N. Geoeological features of subsoil use in Eastern Siberia. All-Russian conference with international participation "Stability of natural and technical systems in the permafrost zone", dedicated to the 60th anniversary of the formation of the IMZ SB RAS (28—30.09.2020). Yakutsk, Institute of Permafrost Science SB RAS, pp. 204—207. (In Russian).
9. Шац М. М. Геокриологические и геоэкономические аспекты освоения месторождений олова Яно-Индигорской провинции (Якутия) // Маркшейдерия и недропользование. — 2019. — № 5 (103). — С. 3—8.
Shats M. M. Geocryological and geoeconomic aspects of the development of tin deposits in the Yana-Indigirsk province (Yakutia). Surveying and Subsoil Use, 2019, no. 5 (103), pp. 3—8. (In Russian).
10. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). — М.: М АИК «Наука/Интерпериодика», 2001. — 571 с.
Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Moscow, M AIK "Science/Interperiodics", 2001, 571 p. (In Russian).
11. Матвеев А. И., Еремеева Н. Г. Технологическая оценка месторождений олова Якутии / Отв. ред. С. М. Ткач. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2011. — 119 с.
Matveev A. I., Eremeeva N. G. Technological assessment of tin deposits in Yakutia. Rep. ed. S. M. Tkach. Novosibirsk, Academic Publishing House "Geo", 2011, 119 p. (In Russian).
12. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. — М.: Стандартиформ, 2006. — 15 с.
GN 2.1.7.2041-06. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in soil. Hygienic standards. Moscow, Standartinform, 2006, 15 p. (In Russian).
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Т. 17: Лено-Индигорский район. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 651 с.
Surface water resources of the USSR. Vol. 17: Leno-Indigirsky district. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972, 651 p. (In Russian).
14. Макаров В. Н., Мокшанцев Б. К. Техногенные геохимические потоки месторождений олова в арктической зоне Якутии // Формирование подземных вод криолитозоны. — Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1992. — С. 48—65.

Makarov V. N., Mokshantsev B. K. Technogenic geochemical flows of tin deposits in the Arctic zone of Yakutia. Formation of groundwater in the permafrost zone. Yakutsk, Institute of Permafrost Science SB RAS., 1992, pp. 48—65. (In Russian).

15. Макаров В. Н. Геохимическая оценка хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов Якутии // Недропользование XXI век. — 2023. — № 3—4 (100). — С. 35—41.

Makarov V. N. Geochemical assessment of tailings of mining and processing plants of Yakutia. Subsoil

use XXI century, 2023, no. 3—4 (100), pp. 35—41. (In Russian).

16. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. — М.: Минздрав России, 2003 (с изменениями на 13.07.17).

GN 2.1.5.1315-03. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in water of water bodies for domestic, drinking and cultural water use. Moscow, Ministry of Health of Russia, 2003 (as amended as of 07/13/17). (In Russian).

Информация об авторе

Макаров Владимир Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (667010, Россия, Якутск, Мерзлотная ул., д. 36), e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru.

FORMATION OF TECHNOGENIC HYDROCHEMICAL FLOWS DURING THE DEVELOPMENT OF TIN DEPOSITS IN THE ARCTIC REGIONS OF YAKUTIA

Makarov, V. N.

Institute of Permafrost Studies Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Yakutsk, Russian Federation)

The article was received on May 28, 2024

For citing

Makarov V. N. Formation of technogenic hydrochemical flows during the development of tin deposits in the Arctic regions of Yakutia. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 549—561. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-549-561. (In Russian).

Abstract

The article analyzes the results of studying technogenic hydrochemical dispersion flows arising during the development of ore and placer tin deposits in the Arctic regions of the North-East of Yakutia. Most of the large tin deposits are located beyond the Arctic Circle: primary (Deputatskoye, Dyakhtardakhskoye, Kester, Ulakhan-Ege-lyakhskoye, Churpunnya, Ege-Khaya) and placer (Smolnikova, Tasappa, Tirektyakh, Chokurdakhskaya) deposits. Development of tin deposits leads to a sharp change in the chemical composition of natural waters and the formation of extensive technogenic hydrochemical flows that negatively affect ecosystems. Pollution of natural waters during the development of tin deposits is associated with abnormal concentrations of mineral suspensions, sulfates, hydrogen, iron, aluminum, manganese, copper, zinc, lead, arsenic, and mercury.

Key words: anomalies, Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia), aquatic environment, environmental impact, hydrochemical anomalies, mining industry, river water pollution, permafrost, tin.

Funding

The research was carried out with the support of the comprehensive program of fundamental scientific research of the Institute of Mechanical Engineering of the SB RAS (Project SB RAS AAAA-A20-120111690008-9).

Information about the author

Makarov, Vladimir Nikolaevich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of Permafrost Studies Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (36, Merzlotnaya St., Yakutsk, Russia, 667010), e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru.