

УДК 338: 504

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-54-64

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ПРИРОДНЫХ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ТЕХНОГЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ДЖИДИНСКОГО ВОЛЬФРАМ-МОЛИБДЕНОВОГО КОМБИНАТА, РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ

Алексей Алексеевич Бурмистров^{1✉}, Алексей Андреевич Самсонов²,
Афанасий Евгеньевич Тельнов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alek.burmistroff2017@yandex.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; afanasy2000@gmail.com

Аннотация. На основании сбора и анализа данных предшественников и собственных геоэкологических исследований в районе Джидинского вольфрам-молибденового комбината (г. Закаменск) в Республике Бурятия произведена приближенно-количественная оценка экологического и связанного с ним экономического ущерба основным компонентам природной среды и населению на этой территории. Показана возможность снижения этого ущерба и улучшения экологической обстановки в этом районе на основе комплексного использования минерального сырья и расширения природоохранных мероприятий в будущем.

Ключевые слова: техногенное месторождение, оценка воздействия на окружающую среду, эколого-экономический ущерб, антропогенные ресурсы, природоохранные мероприятия

Для цитирования: Бурмистров А.А., Самсонов А.А., Тельнов А.Е. Эколого-экономические аспекты разработки природных и связанных с ними техногенных рудных месторождений на примере джидинского вольфрам-молибденового комбината, Республика Бурятия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 54–64.

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF NATURAL AND ASSOCIATED TECHNOGENIC ORE DEPOSITS USING THE EXAMPLE OF THE DZHIDA TUNGSTEN-MOLYBDENUM PLANT, REPUBLIC OF BURYATIA

Aleksey A. Burmistrov^{1✉}, Aleksey A. Samsonov², Afanasy E. Telnov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alek.burmistroff2017@yandex.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; afanasy2000@gmail.com

Abstract. Based on the collection and analysis of data from predecessors and our own geoecological research in the area of the Dzhida tungsten-molybdenum plant (Zakamensk) in the Republic of Buryatia, an approximate quantitative assessment of environmental and associated economic damage to the main components of the environment and the population in this territory was made. The possibility of reducing it and improving the environmental situation in this area based on the integrated use of mineral raw materials and expanding environmental protection measures in the future is shown.

Keywords: technogenic deposit, environmental impact assessment, environmental and economic damage, anthropogenic resources, environmental protection measures

For citation: Burmistrov A.A., Samsonov A.A., Telnov A.E. Ecological and economic aspects of the development of natural and associated technogenic ore deposits using the example of the Dzhida tungsten-molybdenum plant, Republic of Buryatia. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 54–64. (In Russ.).

Введение. Систематические экологические исследования начали проводиться в мире с середины прошлого столетия, когда в окружающей природной среде (ОС) все сильнее стали проявляться признаки нарушения экологического равновесия. К настоящему времени накоплены обширные материалы по геоэкологии многих горнорудных районов России (геоэкологическое картирование, мониторинг состояния

геологической среды), техногенным месторождениям (база данных ВСЕГЕИ, специализированные исследования ВИМС, ИМГРЭ, ВИЭМС и других научно-исследовательских организаций), созданы новые технологии переработки минерального сырья, разработаны эффективные природоохранные мероприятия (ПМ) в недропользовании (методические рекомендации ГКЗ, исследования МГГУ и многих

других организаций). Развитие экономического механизма управления природопользованием позволило создать нормативную и методическую базу для оценки эколого-экономического ущерба (ЭУ) ОС и сопряженным (антропогенным) ресурсам (СР) и требования по их минимизации. Разрабатываются методы математического эколого-экономического моделирования и планирования рационального недропользования [Петрова и др., 2013].

Обобщение и анализ этой информации необходимы для создания системных эколого-геологических моделей (ЭГМ) разрабатываемых месторождений полезных ископаемых разных типов. На наш взгляд эти модели должны включать как минимум 3 уровня, каждый из которых должен включать собственную базу данных с результатами ее анализа. Это необходимо для прогноза экологических последствий и экономических показателей отработки месторождений, подготовленных к освоению. Как известно, стоимость получаемых концентратов и продуктов металлургического передела включает не только затраты на добычу и переработку минерального сырья, но и «экологическую составляющую» — затраты на осуществление природоохранных мероприятий и компенсационных платежей, связанные с возникновением остаточного ущерба ОС и убытков СР. Как было показано ранее в работе [Комаров и др., 1995], посвященной оценке эколого-экономического риска (уровня вероятности потери прибыли) для основных фосфоропроизводящих горнодобывающих предприятий РФ, их величина может быть весьма значительной. Разработка ЭГМ позволит проводить системную оптимизацию экономики недропользования с внедрением профилактических мер, направленных на увеличение объема предотвращенного ущерба (УП).

На *первом уровне* создается цифровая и графическая база данных месторождений по химическому и минеральному составу руд, вмещающих пород и связанных с его отработкой техногенных отходов, по запасам основных полезных ископаемых и сопутствующих химических компонентов, значительно превышающих фоновые концентрации, по распределению этих параметров в объеме изучаемых объектов. В предварительном варианте для рассматриваемой территории это нами было сделано ранее [Самсонов и др., 2024].

На *втором уровне* производится оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) и создается база данных по разным видам химического загрязнения ОС, включающая содержания и накопленные массы химических компонентов руд месторождений, площадей загрязнения и нарушения различных компонентов ОС, что относится к остаточному экологическому ущербу (УО) [Россман и др., 2000].

На *третьем уровне* производится экономическая оценка экологического ущерба, разрабатываются рекомендации по проведению профилактических, текущих и последующих природоохранных меро-

приятий (ПМ) и более рациональному использованию минеральных и других природных ресурсов изученной территории на основе известных разработок, в частности приведенных в работе [Томаков и др., 1994]. В профилактические и текущие ПМ следует включать и новые технологии комплексной переработки природного и техногенного сырья [Арский и др., 1995]. Последующие ПМ — это рекультивация земель горнопромышленных комплексов, которая должна включать работы по переработке руд техногенных месторождений (ТМ), изоляции (консервации) остаточных техногенных отходов до появления возможности их использования в будущем.

В этой публикации проведена приближенно-количественная оценка УО, возникшего в результате многолетней отработки крупных молибденовых и вольфрамовых жильно-штокверковых месторождений Джидинским ВМК (Первомайского, Инкурского и Холтосонского) в районе г. Закаменска, Республика Бурятия, находящегося в бассейне озера Байкал (рис. 1). Проведенные исследования основаны на геологических и геоэкологических данных по существующим там техногенным месторождениям и прилегающей территории г. Закаменска, что соответствует 2-му уровню ЭГМ. Затем была проведена оценка эколого-экономического ущерба ОС и убытков СР вследствие роста заболеваемости населения и снижения качества сельскохозяйственной продукции (3-й уровень ЭГМ) с предложениями по направлениям ПМ, часть из которых относится к внедрению новых технологий в переработку руд ТМ и оценкой УП.

Экологические последствия отработки Холтосонского, Первомайского и Инкурского месторождений. Джидинский ВМК функционировал более шестидесяти лет и прекратил свою деятельность в 1996г. [Ананин, 1999; Ходанович, 1999; Иванова и др., 2016; Бахтин и др., 2003]. В отработанных им вольфрамовых и молибденовых рудах содержались элементы первого, второго и третьего классов опасности: свинец, цинк, фтор, молибден, бериллий, вольфрам, рутений, цезий и многие другие компоненты, выявленные авторами этой статьи по данным опробования хвостов и приведенные ниже. Технология извлечения вольфрамового концентрата предусматривала использование серной кислоты, ксантогената и керосина. Все это привело к значительным масштабам негативного воздействия на ОС и СР на этой территории.

При закрытии комбината не были соблюдены санитарные и экологические требования, предъявляемые к закрываемым предприятиям. Горные работы были прекращены, но горные выработки не ликвидированы, не проведена рекультивация нарушенных земель, не решены вопросы прекращения сброса загрязненных шахтных вод в естественные водоемы, не были реализованы проектные решения по охране окружающей среды в районе г. Закаменска

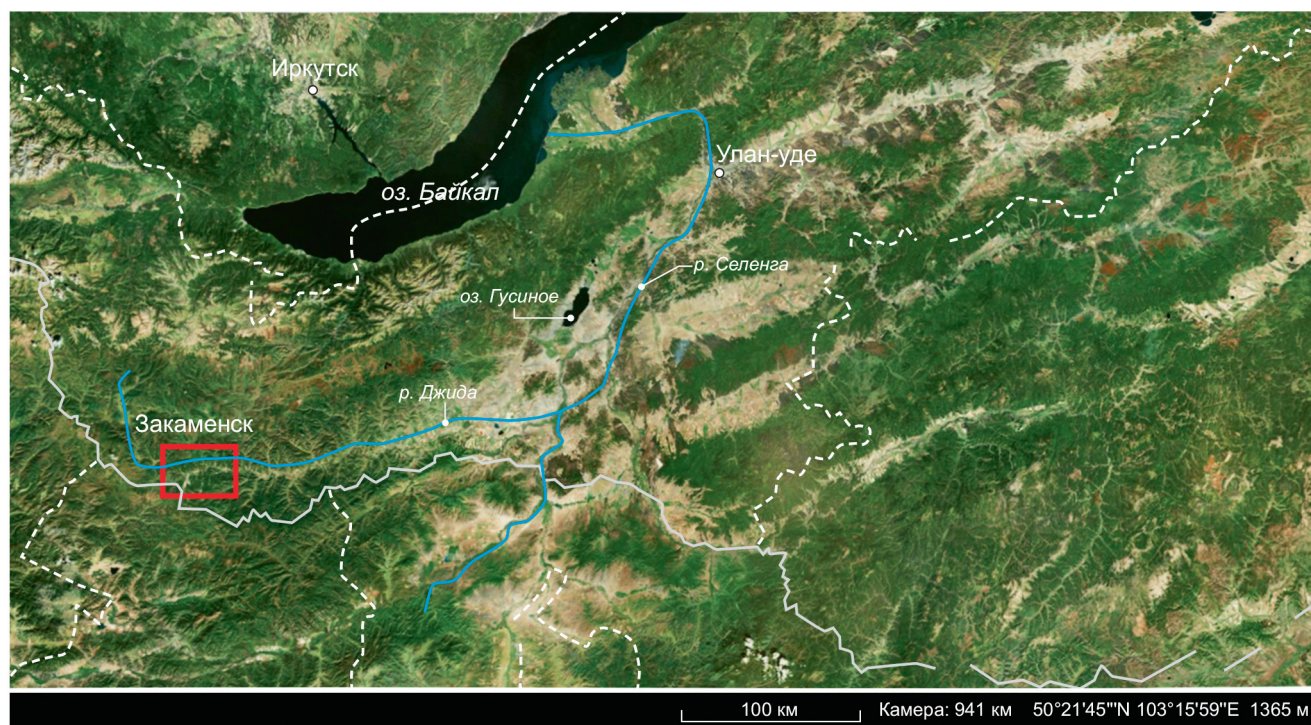


Рис. 1. Географическое положение месторождений Джидинского ВМК

и на прилегающих территориях. Уровень загрязнения воздуха пылью оценивается как высокий, а в отдельные периоды усиления ветрового сноса пыли с хвостохранилища — как очень высокий (до 15 ПДК) [Иванова и др., 2016].

Результаты экологогеохимической оценки почвенного покрова в районе Джидинского комбината показали превышение ПДК по никелю в 3–5, меди в 3, свинцу в 10, цинку в 2, кобальту в 3, марганцу до 2 раз. Установлено, что зона загрязнения почв высокоопасными элементами с большой концентрацией захватывает более половины г. Закаменска. Из-за наползающих на город песчаных отходов комбината в районе хранения новых хвостов наблюдается активное формирование эрозионной сети, в результате чего формируются овраги, через которые хвосты переносятся прямо в город.

На качество воды малого притока р. Джиды (р. Модон-Куль) оказывает влияние неорганизованный сброс шахтных и дренажных вод недействующего Джидинского ВМК. Наблюдения производились в двух створах, 2 км выше г. Закаменска и 1,3 км ниже города (1 км выше устья). Как и прежде, шахтные дренажные воды и ливневые стоки с хвостохранилищ содержат значительные количества металлов, фтора, сульфатов и оказывают существенное влияние на качество воды р. Модон-Куль в обоих створах. Минерализация воды реки менялась от малой (176 мг/куб. дм) до повышенной (864 мг/куб. дм). Окисление сульфидных минералов рудного поля с образованием серной кислоты и выносом опасных для окружающей среды химических элементов с отвалов шахтными, карьерными и инфильтрационными

ми водами привело к загрязнению ряда водотоков бассейна р. Джиды (рек Инкур, Барун-Нарын, Зун-Нарын, Модон-Куль, Гуджирка и Мырген-Шено), являющихся наиболее загрязненными в бассейне оз. Байкал. По данным многолетних наблюдений водородный показатель (рН) вод колеблется от 1,7 до 7, максимальная концентрация сульфатов достигала 36 ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, цинка — 45, кадмия — 1120, хрома — 525 ПДК, содержания мышьяка, меди и никеля также намного выше ПДК (рис. 2; 3). В водах, вытекающих из хвостохранилищ и отвалов некондиционных руд, превышение ПДК зафиксировано по алюминию — в 17, кадмию и цинку — в 7, фтору — в 4 раз, по нефтепродуктам — в 24, меди и селену — в 2 раза [Иванова и др., 2016; Министерство..., 2016].

Приведенные факты загрязнения водных объектов по уровню загрязнений тяжелыми металлами близки приведенным в работе [Колотов и др., 2000] по гидрохимическому изучению водных объектов на территории рудника вольфрам-полиметаллического месторождения Восток-2 в Приморье и ряда других объектов. Показано, что окисление сульфидов приводит к подкислению вод, увеличивая растворимость в них тяжелых металлов. При выходе вод из отстойников происходит увеличение их концентраций уже за счет образования взвесей и переноса их в электрическом слое элементов-гидрализаторов (Fe, Mn, Al, Ti). Рудная пыль, выдуваемая из хвостов, также способствует возникновению кислотных дождей и переходу тяжелых металлов в почвы, где через гумусовый слой они попадают в растения, которые вследствие биологического накопления могут до-

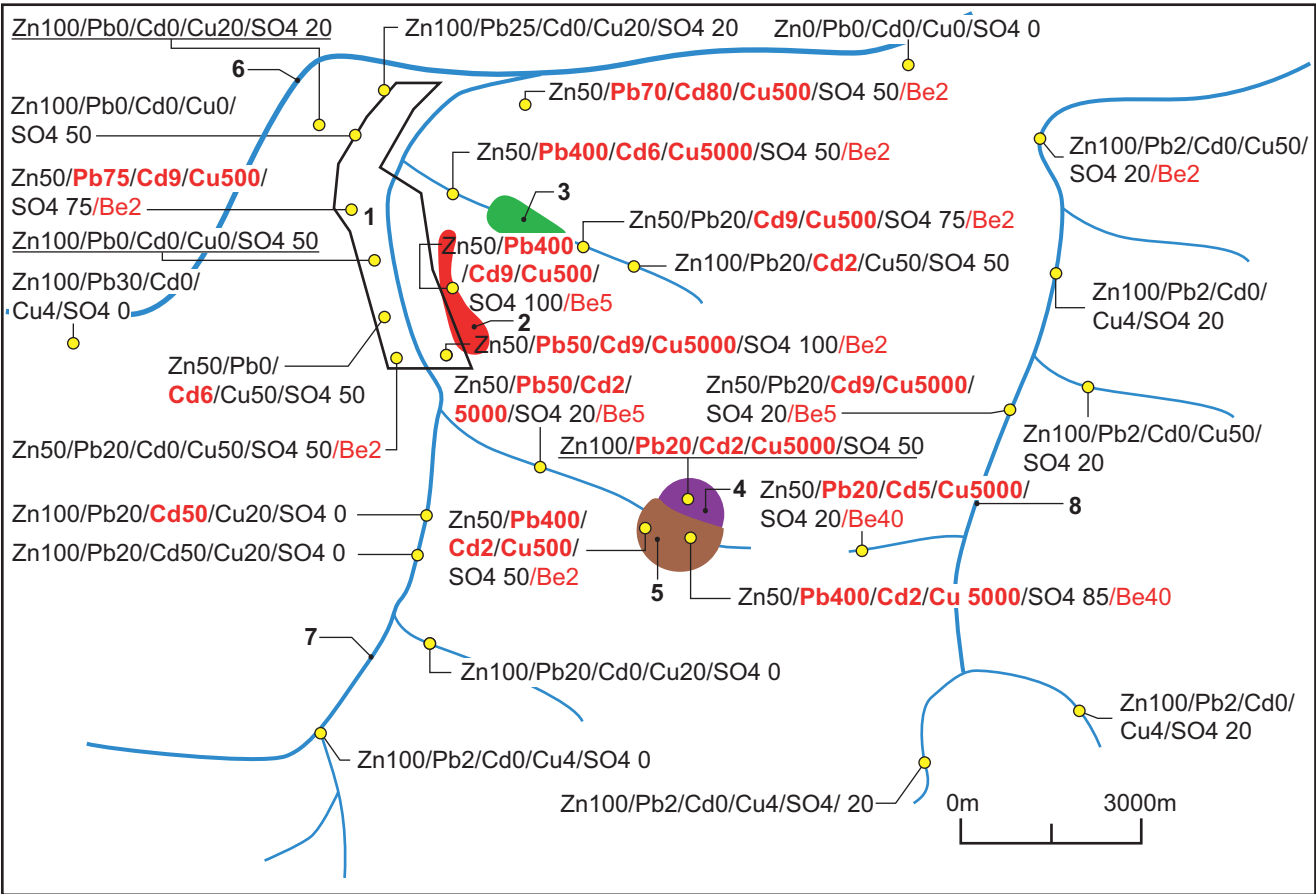


Рис. 2. Гидрогеохимическая схема района г. Закаменска [по Колотову и др., 2000, с изменениями]. Цифровые обозначения на схеме: Zn100/Pb70/Cd6/Cu500/ — содержания элементов (мкг/л) в водных объектах, SO_4^{2-} 50 — содержание сульфат-иона (мг/л) (красным выделены компоненты и их содержания, превышающие ПДК для водных объектов; оранжевыми точками показаны места отбора проб). 1 — г. Закаменск; техногенные месторождения: 2 — Дзидинское; 3 — Барун-Нарынское; территории карьеров, штолен и отвалов природных месторождений: 4 — Первомайского, 5 — Инкурского, Холтосонского; реки и ручьи: 6 — Джида, 7 — Модон-Куль, 8 — Зимка



Рис. 3. Излив штольневых вод из штольни Холтосонского месторождения [natural-sciences...]

полнительно увеличивать их концентрации. После ежегодного отмирания растений осенью концентрация тяжелых металлов в почве возрастает. Поверхностные водные объекты переносят загрязнители далее в акватории рыбхозов.

Статистическая оценка остаточного экологического ущерба ОС. На основании ранее полученных данных [Технико-экономическое..., 2011; Самсонов и др., 2024] по размерам хвостохранилищ и средним концентрациям химических компонентов в хвостах нами произведен приближенно-количественный расчет экологического ущерба ОС, возникающего от загрязнения атмосферы, водных и земельных ресурсов. Сначала производился расчет массы пыли, сдуваемой в течение года с площади поверхности техногенных образований по методике, изложенной в работе [Комонов, Комонова, 2008]. Для этого определялись величины удельного сдувания пыли с 1 м² песков и илов (w , мг/м²с), интенсивность сдувания пыли со всей их поверхности (q , мг/с), средние концентрации пыли в атмосфере (c , мг/м³) и расстояния переноса пыли от хвостохранилища (L , м). Расчеты осуществлялись по следующим формулам:

$$w = a \cdot U^b,$$

где для песков $a = 0,00087$, $b = 4,199$, $U = 2-3$ м/с (в среднем 2,5 м/с) — преобладающая скорость ветра;

$$q = S \cdot w = 0,85 \cdot U \cdot 5 \text{ (м)} \cdot d \cdot c,$$

где c — средняя концентрация пыли в воздухе за границей хвостохранилища (мг/м³); d (м) — ширина отвала с подветренной стороны, величина которой принята равной 1000 м с учетом северо-западной ориентировки долины р. Барун-Нарын, в которой находятся хвостохранилища (рис. 4);

$$L = -144 \cdot \ln[c/(1,42 \cdot 10^{-5} \cdot q)] - 1,91 \cdot H,$$

где H — средняя высота отвала (20 м).

Дополнительный расчет L осуществлялся по формуле:

$$L = U \cdot H/v,$$

где $v = 0,02$ м/с — средняя скорость осаждения пыли [Минералого-геохимические..., 2020].

Расчет интенсивности сдувания пыли с поверхности илов производился для установленной средней величины $w = 1,8-2,8$ мг/м²с (при влажности хвостов 2–6%) при скорости ветра до 4 м/с [Томаков и др., 1994]. Годовая масса сдуваемой пыли (M , т/год) определялась как произведение величины q на время в секундах. Далее определялись годовые выбросы (m_i , т) компонентов-загрязнителей — как произведения массы годового выброса пыли на средние содержания каждого из компонентов в хвостах, установленных по данным опробования скважин Барун-Нарынского месторождения [Технико-экономическое..., 2011], а также по результатам

химического анализа методом ICP MS) отобранных нами проб песков и илов (табл. 5). Исследования выполнены методом ИСП-МС с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой, адаптированного для работы с системой лазерного пробоотбора SUPEC 7000, приобретенного по Программе развития МГУ; аналитик с.н.с. кафедры геохимии И.Ю. Николаева. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Показатели интенсивности и масштабов сдувания пыли с поверхности хвостохранилищ около г. Закаменска

Техногенные образования	q , г/с	c , мг/м ³	M , т/год	L , м
Пески	39	5	173	1275
Илы	1597	188	6912	1806 (2000)

Примечание: в скобках приведена оценка разноса пыли при средней скорости ее выпадения 2 см/с [Методические..., 2020]

Таблица 2

Средние концентрации некоторых химических компонентов в хвостах и массы годовых выбросов их в атмосферу с поверхности хвостохранилищ около г. Закаменска

Компоненты выбросов	пыль	Cd	As	Pb	H ₂ SO ₄	Cr
C_i , г/т		82	239	597	22000	128
m_i (год), т	7000	1	2	4	154	1

Массы годовых сбросов каждого компонента (m_i , т) в водные объекты определялись как произведение концентрации (C_i , мг/м³) i -го компонента в сточных водах на годовой объем сточных вод:

$$m_i = C_i \cdot H \cdot S,$$

где $H = 0,4$ м — среднегодовое количество осадков в районе г. Закаменска, S (м²) — площадь техногенных образований в районе г. Закаменска.

Величина C_i определялась как среднее из данных гидрогеохимической съемки (рис. 2) в местах стока вод около хвостохранилищ, для содержаний фтора в поверхностных водах по данным работы [Ломоносов и др., 2008], а Cu, As и Zn также прямым расчетом — по концентрации этих элементов в кислых рудничных водах C_i (мг/м³) для известной величины сульфидности руд [Борисова и др., 1992], среднее значение которой для хвостов Барун-Нарынского месторождения по данным опробования скважин составляет 2,2%, а для отвала сульфидных песков она была принята равной 30%. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Суммарный показатель загрязнения в верхнем слое почвы за счет привноса пыли с высокими содержаниями Zn, Cu, Pb, Bi, S, Be, Cd, As составил 540 (очень высокая степень загрязнения [Россман и др.,

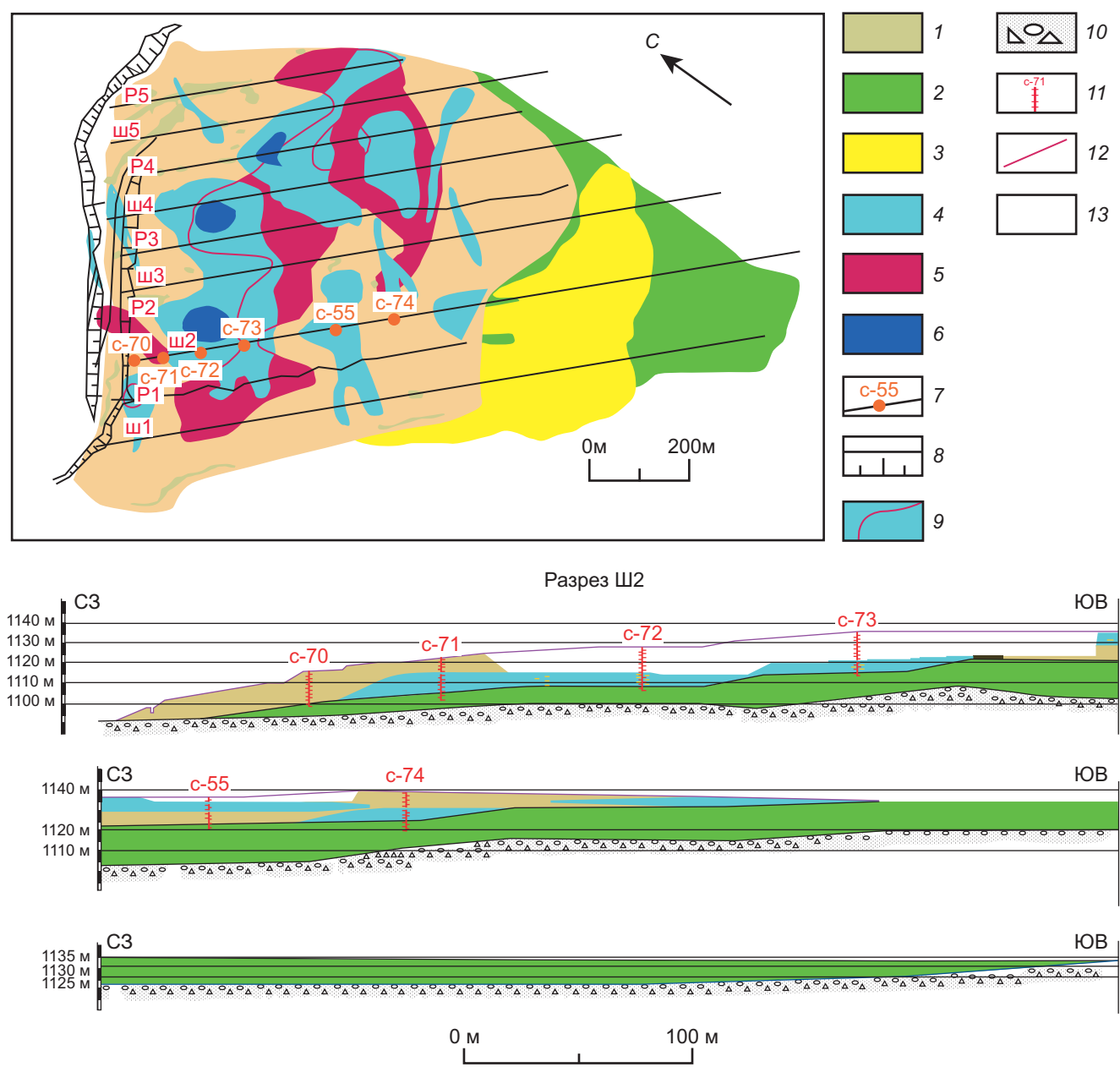


Рис. 4. Геологическая схема Барун-Нарынского техногенного месторождения с данными по содержаниям WO_3 и серы на гор. +1125 м и геологическим разрезом по разведочному профилю Ш2. 1–2: вольфраморудные пески (1) и илы (2), 3 — сульфидные пески; 4–6 — геохимические ореолы с содержаниями: WO_3 : 4 — более 0,09%, 6 — более 0,15%; серы: 5 — более 2%; 7 — разведочные профили (профиль Ш2 со скважинами и их номерами); 8 — дамба хвостохранилища; 9 — контуры ореолов серы в пределах площади ореолов триоксида вольфрама; 10 — аллювий долины р. Барун-Нарын; 11 — разведочные скважины с их номерами; контур поверхности хвостов до отработки; 13 — открытая поверхность долины р. Барун-Нарын

Таблица 3

Годовой сброс некоторых химических компонентов за счет естественного выщелачивания руд Барун-Нарынского и Модонкульского техногенных месторождений

Компоненты	Cu	Zn	As	Fe	Cd	Pb	Be	F
Сброс, т/год (хвосты)	200 (10)	130 (180)	(9)	(14)	9	55	20	880
Сброс, т/год (сульфидные пески)	225	370	6	55				

Примечание: в скобках приведен расчетный годовой сброс (Cu, Zn, As), данные по концентрации в воде F взяты из работы [Ломоносов и др., 2008].

2000)). Он был рассчитан по концентрациям этих элементов в хвостах по формуле Саэа:

$$Z_c = \sum_{k=0}^n x_i - (n-1),$$

где x_i — отношение средней концентрации i -го компонента к его фоновой концентрации в почвах [Водяницкий, 2008] (в отдельных случаях вместо фоновых нами были взяты значения ПДК или ОДК); n — число химических компонентов.

Оценка эколого-экономического ущерба ОС района г. Закаменска. Оценка ущерба производилась для площади г. Закаменска и прилегающих территорий, включая территорию Джидинского ВМК. Стоимостная оценка ущербов от загрязнения земель (Y_3) и от несанкционированных свалок отходов (Y_{nc}), определялись по нижеприведенным формулам [Россман и др., 2000]:

$$Y_3 = \sum_{i=1}^n K_c \cdot S_i \cdot K_b \cdot K_{zi} \cdot K_3 \cdot K_r, \quad (1)$$

$$Y_{nc} = \sum_{i=1}^n Нп_i \cdot m_i \cdot K_3 \cdot 25 \cdot K_b, \quad (2)$$

где $Нп_i$ (руб.) — норматив платы за размещение 1 т отходов i -го вида; m_i (т, куб. м) — масса отхода i -го вида; K_c (тыс. руб./м²) — кадастровая стоимость земель (на данный период для сероземов Республики Бурятия, используемых для садоводства и населенных пунктов, она составляет 167,65 руб./м²) [Приказ..., 2021]; K_b — коэффициент пересчета в зависимости от периода времени по восстановлению земель (нами взяты его значения для 1 года — 0,9 и для 15 лет — 7); S_i (м²) — площадь загрязнения хим. веществом i -го вида; K_{zi} — коэффициент пересчета в зависимости от степени загрязнения земель i -го вида (2 — очень сильная, что соответствует рассчитанному нами ранее коэффициенту суммарного загрязнения $Z_c = 540$) [Минералого-геохимические..., 2020]; K_3 — коэффициент экологической ситуации экономического района (1,1); K_r — коэффициент пересчета в зависимости от глубины загрязнения земель (принят для минимальной глубины равным 1).

Для определения этих коэффициентов были использованы справочные материалы, приведенные в работе [Россман и др., 2000]. Базовые нормативы платы взяты из опубликованных данных [Постановление..., 2023].

Ущерб от загрязнения атмосферы (Y_a) и водных ресурсов (Y_b), соответствующие платам за их загрязнение, определялись по следующей формуле [Россман и др., 2000]:

$$Y_{a(b)} = K_{инд} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot m_i \cdot k, \text{ руб.}, \quad (3)$$

где n — число видов (i) загрязняющих веществ; m_i — масса годового выброса i -го загрязняющего вещества в атмосферу или сброса его в водные объекты (в пределах ПДС, ПДВ или установлен-

ных лимитов); P_i — базовый норматив платы за выброс (сброс) 1 т i -го загрязняющего вещества; k — коэффициент экологической ситуации региона (для данного района он равен 1,1 — для атмосферы и 1,4 — для водных ресурсов); $K_{инд}$ — коэффициент индексации ставок P_i .

При превышении концентрации C_i i -го вредного компонента в выбросе или сбросе его ПДК_{*i*}, при котором не выполняется следующее соотношение:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1,$$

где $C_i = C_{\text{выброса}} + C_{\text{фоновое}}$, а также в случае превышения величин ПДС_{*i*} и ПДВ_{*i*}, плата за соответствующие ущербы возрастает в 5-кратном размере по массе превышения относительно ПДС_{*i*} и ПДВ_{*i*} или по всей массе при превышении ПДК_{*i*}. В данной работе эти случаи не рассматривались ввиду отсутствия данных экомониторинга по фактам превышений ПДК по каждому изученному компоненту-загрязнителю.

Ниже приводится расчет годового остаточного ущерба атмосфере (по вышеприведенной формуле 3) за счет выброса пыли, содержащей от 20 до 70%, SiO₂, а также Cd, As, Pb, H₂SO₄(SO₂), Cr⁶⁺, средние содержания которых в отобранных пробах хвосты (С, г/т) определены нами по данным химического анализа методом ICP MS с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой, адаптированного для работы с системой лазерного пробоотбора SUPES 7000, приобретенного по Программе развития МГУ; аналитик с.н.с. кафедры геохимии И.Ю. Николаева) (табл. 5), а также по результатам опробования разведочных скважин [Технико-экономическое..., 2011].

$$\begin{aligned} Y_{O_a} &= K_{инд} \cdot K_3 \cdot (P_{\text{пыль}} \cdot m_{\text{пыль}} + \\ &+ 0,007 \cdot (C_{Cd} \cdot P_{Cd} + C_{As} \cdot P_{As} + C_{Pb} \cdot P_{Pb} + \\ &+ C_{SO_2} \cdot P_{SO_2} + C_{Cr} \cdot P_{Cr})) = \\ &= 1,26 \cdot 1,4 \cdot (56,1 \cdot 7000 + 0,007 \cdot (82 \cdot 14759,3 + \\ &+ 239 \cdot 1823,6 + 597 \cdot 18244,1 + 22000 \cdot 45,4 + 3647 \cdot 128)) = \\ &= 870 \text{ тыс. руб./год.} \end{aligned}$$

Массы химических компонентов в этом расчете получены путем умножения их концентраций (C_i , г/т) в пыли от хвостов на рассчитанную ранее годовую массу сноса пыли (0,007 млн т). Базовые нормативы платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу (P_i , руб/т) соответствуют 2018 г. и поэтому взяты с коэффициентом индексации 1,26 [Постановление..., 2023].

Аналогично предыдущему расчету по формуле 3 рассчитывался годовой ущерб от загрязнения водных ресурсов (Y_b) (табл. 6).

Расчет годового ущерба от складирования техногенных отходов, содержащих компоненты 1-го (Zn, Pb, Cd, As), 2-го (Cu, Mo, Cr) и 3-го (W) классов опасности, произведен по их накопленным массам в хвостохранилищах в соответствии с формулой 2:

Таблица 5

Содержания (г/т) ряда элементов в пробах керна разведочных скважин месторождения Барун-Нарын

№ пробы	Be	P	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Zr	Nb	Mo	Ru	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Hf	Ta	W	Au	Pb	Bi
C-4501	40	504	57	23	71	15369	2	7	57	23	22	3	99	27	8	122	0,003	5	2	8	18	2	1,02	0,5	456	0,09	286	41
C-1401	61	982	90	62	112	28035	16	23	200	59	21	5	124	11	2	12	<0,001	5	6	9	10	2	0,36	0,1	591	0,03	316	26
C-1406/10	43	984	79	62	106	26850	16	23	186	47	18	4	41	12	2	8	0,002	5	5	6	10	2	0,36	0,1	413	0,05	277	17
C-1410	43	879	85	57	104	27373	15	20	213	55	19	4	12	10	2	11	<0,001	8	6	7	12	2	0,40	0,1	476	0,07	406	21
C-5601	44	679	83	80	106	23540	13	25	204	71	18	4	15	9	2	14	<0,001	6	8	8	5	1	0,32	0,1	845	0,02	387	26
C-5605	65	870	91	91	102	22684	13	27	186	59	18	5	8	9	2	11	0,002	5	7	8	13	1	0,34	0,1	482	0,02	274	26
C-5612	72	1128	113	108	122	21694	11	30	266	82	26	5	9	10	2	22	<0,001	6	9	16	15	2	0,32	0,1	763	0,02	347	45
Z-32046	6	1060	127	162	96	34620	27	131	79	15	17	2	20	21	5	23	<0,001	1	1	2	5	0	0,85	0,4	101	0,01	78,5	7
Z-37012	44	1108	158	179	198	24393	10	48	296	77	28	5	9	11	2	42	0,005	8	8	16	9	2	0,39	0,1	811	0,03	438	61
БН-И	48	937	129	156	158	23970	10	40	317	65	28	5	8	7	2	39	0,004	11	6	18	13	2	0,29	0,1	739	0,02	445	70

Таблица 6

Годовой ущерб водным ресурсам за счет сброса в них некоторых химических компонентов сточных вод

Компоненты	Cu	Zn	As	Fe	Cd	Pb	Be	F	Суммарный У _в , млн руб./год
У _в , млн руб./год	290	50	0,3	2	5	6	44	1	358,3

$Y_{\text{нс}} = 25 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot [4643,7 \text{ руб./т} \cdot (30 \text{ т.т} + 26 \text{ т.т} + 11 \text{ т.т} + 4 \text{ т.т}) + 1990,2 \text{ (руб./т)} \cdot (13 \text{ т.т} + 2 \text{ т.т} + 6 \text{ т.т}) + 1327 \text{ руб./т} \cdot 34 \text{ т.т}] = 10311 \text{ млн руб./год.}$

Только за 15 лет существования данных техногенных отходов после окончательного закрытия Джидинского ВМК (с учетом коэффициента времени существования отходов для этого периода равного 7) $Y_{\text{нс}}$ составил:

$Y_{\text{нс}} = 25 \cdot 1,1 \cdot 7 \cdot [4643,7 \text{ руб./т} \cdot (30 \text{ т.т} + 26 \text{ т.т} + 11 \text{ т.т} + 4 \text{ т.т}) + 1990,2 \text{ (руб./т)} \cdot (13 \text{ т.т} + 2 \text{ т.т} + 6 \text{ т.т}) + 1327 \text{ руб./т} \cdot 34 \text{ т.т}] = 80\,198 \text{ млн руб.}$

Годовой ущерб от загрязнения земель (формула 1) составил:

$Y_3 = 167,65 \text{ руб./м}^2 \cdot 2\,000\,000 \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,1 = 665 \text{ млн руб./год.}$

За 15 лет существования загрязнений высокого уровня на площади 2 км² он составит:

$Y_3 = 167,65 \text{ руб./м}^2 \cdot 2\,000\,000 \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 1,1 = 5174 \text{ млн руб.}$

Суммарный годовой эколого-экономический ущерб (УЭ), таким образом, составляет 11335 млн руб. Для сравнения приведем данные из работы [Максимова, 2018] по оценке УЭ от хранения золотосодержащих отходов Кемеровской области: при ежегодном увеличении их массы на 2,7 млн т он возрастает на 49 млн руб. и для общей накопленной массы 50 млн т с учетом времени их существования он оценивается в 920 млрд руб. При этом надо учесть, что ставка платы за размещение 1 т этих отходов составляет всего 115 руб./т (нетоксичные отходы).

Для расчета удельного годового УЭ (УЭ_{уд}, рублей на единицу произведенной ГОКом продукции) ориентировочно принимаем среднюю производительность комбината — 3 тыс. т/год (1936–1996). При этом полученная его величина в 3,8 млн руб. на 1 т концентрата очевидно относится к послед-

нему периоду работы этого предприятия, когда УЭ стал максимальным. В него не включен ущерб сопряженным ресурсам, который мал по сравнению с УЭ (примерно 5–7 млн руб. в год), хотя и очень опасен для населения, как это будет показано ниже. Если взять общее количество отработанной руды (45 млн т) и принять, что средний годовой УЭ в течение 60-летней истории работы ГОКа составлял примерно половину от современного, то можно рассчитать средний годовой удельный эколого-экономический ущерб (УЭ_{уд}), возникающий при добыче 1 т руды в год:

$УЭ_{\text{уд}} \approx 11335 \text{ (млн руб./год)} \cdot 60 \text{ (лет)} / [2 \cdot 45 \text{ (млн т)}] \approx 7500 \text{ руб./т.}$

Для сравнения приведем значение среднего годового УЭ_{уд} для Sn-W месторождений дальнего Востока (Солнечный ГОК), рассчитанного по данным, взятым из работы [Борисова, 1992], с учетом индекса инфляции (130) для периода 1991–2023 гг.:

$УЭ_{\text{уд}} = 1,94 \text{ (руб./т)} \cdot 130 \approx 260 \text{ руб./т.}$

Такое большое различие в значениях УЭ_{уд} связано с тем, что в конце 1980-х годов еще не существовали современные нормативы платы за складирование отходов, на которые приходится львиная доля всех платежей за ущерб ОС.

Для сравнения также приведем расчеты годового ущерба ОС от нарушенных земель (У_{нз}) по укрупненным нормативам по следующей формуле [Россман и др., 2000]:

$$Y_{\text{нз}} = K_{\text{инд}} \cdot \sum B_i (\text{руб./га}) \cdot S(\text{га}),$$

где B_i (руб./га) — показатель годового экономического ущерба от нарушений i -го типа (в данном случае это отвалы, карьеры, хвостохранилища); в ценах 1984 г. он составляет для карьеров глубиной более 100 м в лесной зоне — 96 руб./га, для отвалов высотой до 100 м — 140 руб./га, для хвостохранилищ — 560 руб./га; $S(\text{га})$ — площадь нарушений определенного типа.

Соответственно, суммарный $Y_{\text{нз}}$ от указанных типов нарушенных земель (при значении $K_{\text{инд}}$ для периода 1991–2023 гг. равного 130) для вышеуказанных видов нарушений он составляет:

$$Y_{\text{нз}} = (1+10+15) = 26 \text{ млн руб./год}$$

Полученное значение $Y_{\text{нз}}$ меньше величины ущерба от загрязнения земель, рассчитанного нами выше. Различие в значениях $Y_{\text{нз}}$ связано с существованием до начала 1990-х годов упрощенных расчетов и нормативных требований по платежам за ущерб ОС.

Ущерб антропогенным ресурсам. Санитарно-медико-эпидемиологические последствия деятельности Джидинского ВМК очень значительны, что связано как с масштабами техногенных отходов, так и значительным временем их существования (с конца 1930-х годов).

Суммарный индекс опасности для взрослого и детского населения г. Закаменска в условиях комплексного комбинированного поступления химических веществ наиболее высок для органов дыхания (17–18) и центральной нервной системы (8–9), для других органов — от 1 (для печени) до 3–4 — для гормональной системы [Вековшина и др., 2017]. По данным детальных медико-экологических исследований [Май и др., 2018] основными факторами канцерогенного риска являются металлы (кадмий, никель, хром, кобальт, бериллий, мышьяк, свинец и др.), поступающие с атмосферным воздухом. Присутствие металлов, обладающих канцерогенными свойствами, в атмосферном воздухе, почве, продуктах питания, питьевых водах, формирует ненормативное качество объектов среды обитания (2,34 ПДК — в атмосферном воздухе, до 4 ПДК — в питьевой воде общественных и частных колодцев), что свидетельствует о необходимости исключения колодцев из систем питьевого водоснабжения граждан территории наблюдения. Сложившиеся уровни экспозиции жителей территории наблюдения опасными канцерогенными веществами формируют недопустимые риски в отношении развития онкологических заболеваний (суммарный индивидуальный канцерогенный риск — до $4,87 \cdot 10^{-3}$). Основной вклад в величину общего суммарного индивидуального канцерогенного риска (ТСЯ) вносит поступление анализируемых химических веществ с атмосферным воздухом (вклад в величину ТСЯ до 93,9%) и пищевыми продуктами (вклад в величину ТСЯ до 74,8%).

По данным Территориального фонда обязательного медицинского страхования, заболеваемость по обращаемости взрослого населения территории наблюдения достоверно превышала заболеваемость населения территории сравнения как в целом по классу «новообразования» — в 1,15–5,48 раза (в 2010–2015 гг.), так и по отдельным нозологическим группам подкласса «злокачественные новообразования кожи», «злокачественные новообразования мезотелиальной и мягких тканей», «злокачественные новообразования глаза, головного мозга и других отделов центральной нервной системы» (С43–С44, С45–С49, С69–С72, заболеваемость в указанных группах составила соответственно 0,931; 0,072 и 0,143 случаев /1000 чел. при отсутствии данных диагнозов на территории сравнения); «злокачественные новообразования мужских половых органов» (С60–С63; в 1,65 раза). В группе наблюдения зарегистрированы достоверно более высокие по сравнению с территорией сравнения уровни кадмия в крови; отмечена тенденция к более высокому уровню содержания в крови детей никеля и хрома. Регистрация канцерогенных химических веществ в биосредах населения, проживающего в зоне влияния отходов горнорудного комбината, может быть обусловлена их присутствием в среде обитания.

Уровень первичной заболеваемости взрослого населения муниципального района новообразованиями с 2009 по 2014 год вырос на 169,6%. Для территории субъекта РФ в целом темп прироста данного показателя за период 2009–2014 гг. составил 30,1% [Май и др., 2018]. Полученные результаты свидетельствуют, что выявленные нарушения могут быть ассоциированы с факторами риска среды обитания населения, проживающего в зоне влияния отходов горнорудного комбината.

С учетом некоторых современных данных по стоимости полисов ОМС и лечения онкозаболеваний [sravni.ru] и легочных заболеваний [rgnkc.ru] эти убытки для населения могут составлять до первых млн руб. в год и первых сотен руб. в год на одного пациента, соответственно. Эти виды заболеваний взяты как наиболее распространенные в этом районе [Май и др., 2018].

Ущерб (убытки) сопряженным (антропогенным) ресурсам, в данном случае, собственникам земель сельскохозяйственного назначения можно оценить по снижению качества продукции и урожайности [Россман и др., 2000]. Этот ущерб в экологическом отношении связан с хроническими заболеваниями, о которых речь шла выше. Зараженные тяжелыми металлами растения усваиваются сельскохозяйственными животными, что и объясняет зараженность ими мясомолочной продукции.

Одним из способов проведения ПМ здесь является внесение карбонатов в почвы, снижающих кислотность вод, а также установка очистных сооружений на выходах рудничных вод [Колотов и др., 2000]. Эффективным и недорогим способом извле-

чения U, Au, Be, Cd и др. из руд и рудничных вод является очень давно известное в мире бактериальное выщелачивание, используемое в частности для обогащения бедных руд (США). Тионовые и другие виды бактерий производят серную кислоту из сульфидов и переводят тяжелые металлы в растворимое состояние. Экологически допустимым является вариант утилизации остаточных техногенных отходов, при котором они будут экранироваться от водной и ветровой эрозии, например, современными полимерными покрытиями [Комонов, Комонова, 2008]. Антропогенные ресурсы (коммунальные хозяйства и др.) вынуждены нести дополнительные затраты на очистку вод в зонах их загрязнения, а порой также земельных участков и атмосферы.

Общая и текущая экономическая оценка использования природных ресурсов. Экономическая оценка природных ресурсов имеет свои специфические особенности, часто не учитываемые при выборе проектов их освоения. В общей экономической оценке имеющихся на данной территории природных и техногенных ресурсов применяются расчеты их стоимости с учетом как основных, так и второстепенных направлений их использования, а также использования их в будущем, когда станет возможным применение более эффективных технологий переработки минерального сырья и будут усовершенствованы как оценка проектов отработки, так и экономический механизм регулирования природопользования; возрастут цены на получаемую продукцию вследствие уменьшения содержаний полезных компонентов в природных месторождениях и роста глубин их отработки [Петрова и др., 2013; Гиусов и др., 1998]. Это особенно важно в случае, если рядом имеются ценные природные объекты (в данном случае это бассейн оз. Байкал).

Текущая экономическая оценка эффективности ПМ основана на расчете общего экономического результата (ОЭР) от их проведения, включая комплексную переработку сырья [Бурмистров, 2002]:

$$\text{ОЭР} = \text{Д1} + \text{Д2} + \text{Д3} - 31 - 32,$$

где Д1 — доход (включая льготы и субсидии) от получения новой продукции, в т.ч. стройматериалов для местных нужд, Д2 — доход от снижения платежей за загрязнение и нарушение ОС (снижение УО), передачи рекультивированных земель другим собственникам, Д3 — рост доходов СР за счет снижения объемов проводимых ПМ и уменьшения соответствующих убытков, улучшения качества продукции и здоровья населения, 31 — затраты на внедрение новых технологий, консервацию остаточных техногенных отходов и рекультивацию земель, 32 — платежи за загрязнение ОС при отработке техногенных месторождений.

Величина 32 снижается при внедрении различных видов ПМ (оборотное водоснабжение, орошение отработываемых поверхностей хвостов и др.).

Заключение. В данной работе произведен приближенно-количественный расчет эколого-экономического ущерба окружающей среде и антропогенным ресурсам в районе г. Закаменска. Масштабы его внушительны, несмотря на то что в расчетах нами не учитывались превышения уровней выбросов и сбросов над ПДВ и ПДС или установленными лимитами, существенно влияющими на рост платежей за загрязнения ОС. Эти данные можно получить только по результатам экомониторинга. Наибольший УЭ возник от многолетнего складирования техногенных отходов, содержащих ряд опасных попутных компонентов.

Необходимо отметить, что масштабы загрязнений ОС в процессе переработки техногенных отходов снижаются медленно, так как эта отработка требует значительного времени и сама по себе также наносит экологический ущерб ОС, возникают вторичные хвостохранилища. Отвалы забалансовых руд гораздо слабее подвергаются выветриванию и разрушению, но объемы их в десятки раз больше, чем хвостов. Масса опасных загрязнителей — попутных компонентов руд, уменьшается только в случае комплексной переработки хвостов.

Важно также подчеркнуть, что стоимость УЭ возрастает пропорционально времени как самого его существования (загрязненная ОС), так и существования его источников. Например, при постоянном нахождении около источников слабо радиоактивного заражения за большой период времени все равно может быть получена высокая доза поглощенного излучения, а уран и другие тяжелые металлы могут накопиться на геохимических барьерах рядом.

Отработка крупных остаточных запасов Инкурского и, в значительно меньшей степени, Холтосонского месторождений в будущем может привести к тому, что подавляющая часть минерализованной горной массы останется на земной поверхности в виде новых отвалов и хвостов в еще большем объеме, чем это было в ходе работы Джидинского ВМК.

В настоящее время благодаря отработке Барун-Нарынского техногенного месторождения АО «ЗАКАМЕНСК» остаточный экологический ущерб в районе г. Закаменска сокращается. В тоже время, кардинальное решение этой проблемы возможно в двух случаях: внедрение малоотходных и безотходных технологий в процесс обогащения техногенных руд, либо консервации техногенных отходов. Наиболее эффективным будет их сочетание, т.к. часть компонентов руд можно извлечь, а часть пока еще нет.

Следует отметить, что стоимость ПМ очевидно может быть в разы меньше стоимости остаточного экологического ущерба и убытков антропогенным ресурсам, в т.ч. связанных со здравоохранением. Эти вопросы могут быть успешно решены при системном и комплексном подходе — создании ЭГМ, которые помогут осуществлять прогнозирование величин УЭ для месторождений, подготовленных к освоению, что является составной частью проектов разведочных кондиций [Методические..., 1995].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананин В.А. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горнодобывающего комплексов Республики Бурятия: пути решения проблемы Джидинского вольфрамо-молибденового комбината. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 46 с.
- Арский Ю.М., Архипов Н.А., Аюров В.Д. и др. Рациональное природопользование в горной промышленности / Под общ. ред. проф. В.А. Харченко. М.: Изд-во МГГУ, 1995. 407 с.
- Бахтин В.И., Барский В.Ф., Дорошкевич Г.И. и др. Состояние, освоение и перспективы развития минерально-сырьевой базы Республики Бурятия. Геологической службе Бурятии — 50 лет: Материалы регион. науч.-практ. конф. Улан-Удэ, 2003. 156 с.
- Борисова Н.В. Оценка эколого-экономического ущерба окружающей среде в районах деятельности горнодобывающих предприятий Дальнего Востока. (Росгеолфонд). Хабаровск: ДВМИС, 1992. 120 с.
- Бурмистров А.А. Эколого-экономическая оценка месторождений (твердые полезные ископаемые): Уч. пособие / Под ред. проф. В.И. Старостина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 186 с.
- Вековичина С.А., Клейн С.В., Ханхареєв С.С. и др. Оценка качества среды обитания и рисков для здоровья населения г. Закаменска — территории длительного хранения отходов Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // Hygiene sanitation (Russian Journal). 2017. № 96 (1). С. 15–20.
- Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М., 2008. 140 с.
- Гирусов Э.В., Бобылев С.Н., Новоселов А.Л. Экология и экономика природопользования. М.: ЮНИТИ, 1998. 455 с.
- Иванова О.А., Куклина Т.С. Экологические последствия добычи вольфрамовых руд (на примере Закаменского района республики Бурятия) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология. Поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3. С. 95–101.
- Колотов Б.А., Соломин Г.А., Рубейкин В.З. и др. Гидрогеохимические процессы как основа взаимодействия геологических тел, подверженных антропогенезу, и окружающей среды (на примере сульфидных отвалов): Сб. научн. тр. «Прикладная геохимия». М.: ИМГРЭ, 2000. С. 70–97.
- Комаров М.А., Григорьев Н.П., Кимерман Ю.А. Эколого-экономический риск и оценка минерально-сырьевого потенциала // Разведка и охрана недр. 1995. № 8. С. 17–21.
- Комонов С.В., Комонова Е.Н. Ветровая эрозия и пылеподавление. Курс лекций. Красноярск: Изд-во СФУ, 2008. 192 с.
- Ломоносов И.С., Гребенищикова В.И., Брюханова Н.Н. и др. Распределение селена и фтора в компонентах окружающей среды Прибайкалья // Проблемы региональной экологии. 2008. С. 22–29.
- Май И.В., Клейн С.В., Вековичина С.А. и др. Гигиеническая оценка канцерогенного риска и онкологической заболеваемости населения, проживающего в зоне влияния мест складирования отходов горнорудного комбината. ЗНИСО // Коммунальная гигиена. 2018. № 5 (302). С. 40–49.
- Максимова А.М. Организационно-экономический механизм извлечения редких и редкоземельных металлов из отходов горнодобывающих предприятий: Дисс. ... канд. экон. наук. М., 2018.
- Методические рекомендации к экологическому обоснованию проектов разведочных кондиций на минеральное сырье. М.: Минприрода, ГКЗ. 1995. 30 с.
- Минералого-геохимические критерии оценки экологической опасности горнопромышленных территорий. Методические рекомендации № 200. ФГБУ «ИМГРЭ». М., 2020. 53 с.
- Министерство природных ресурсов Республики Бурятия: государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия» [Электронный ресурс]. URL: http://www.minpriroda-rb.ru/activity/in-dex.php?SECTION_ID=921 (02.03.2016).
- Петрова А.И., Никулин. И.Б., Ле Бинь Зыонг и др. Моделирование эколого-экономических параметров природоохранной деятельности: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). М.: Горная книга, 2013. № 12. 60 с.
- Постановление Правительства Российской Федерации от 20 марта 2023 года № 437 «О применении в 2023 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду».
- Приказ от 9 марта 2021 г. № 18 «Об утверждении среднего уровня кадастровой стоимости земель по муниципальным районам (городским округам) Республики Бурятия».
- Росман Г.И. Экологическая оценка рудных месторождений. М.: Наука, 2000. 150 с.
- Самсонов А.А., Бурмистров А.А., Тельнов А.Е. Рудный потенциал природных и техногенных месторождений вольфрама района г. Закаменска (Республика Бурятия) в контексте перспектив его комплексного использования // Руды и металлы. 2024. № 1.
- Технико-экономическое обоснование разведочных кондиций для подсчета запасов Барун-Нарынского техногенного месторождения. ООО НИиПИ «ТОМС». Иркутск, 2011.
- Томаков П.И., Коваленко П.Л., Михайлов А.М. и др. Экология и охрана природы при открытых горных работах. М.: Изд-во МГГУ. 1994. 417 с.
- Ходанович П.Ю. Лежалые отходы обогащения Джидинского вольфрамо-молибденового комбината как комплексные техногенные месторождения // Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горнодобывающего комплексов Республики Бурятия. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 165 с.
- natural-sciences.ru/Главная/article/view?id=37515
- rgnkc.ru/Платные услуги/Разделы платных услуг
- sравни.ru/dms/onkologiya/

Статья поступила в редакцию 14.12.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024