

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

К.г.-м.н. Е.П. Янин

Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва
yanin@geokhi.ru

В обзоре рассматриваются основные аспекты влияния разработки месторождений цветных и редких металлов на окружающую среду. Показано, что добыча руд оказывает негативное воздействие на недра, ландшафты, воздушный и водный бассейны. Формирующиеся в горнорудных районах зоны техногенного загрязнения отличаются высокой устойчивостью; их негативное воздействие сказывается многие десятки лет после прекращения функционирования предприятий. Активная горнодобывающая деятельность способна оказывать влияние на значительные территории, формируя региональные зоны техногенного загрязнения (техногенные аномальные геохимические поля), которые могут накладываться на так называемые биогеохимические провинции, в настоящее время рассматриваемые как специфические (атипичные) экосистемы на континентах.

Содержание

1. Общая характеристика масштабов техногенного воздействия в горнорудных районах
 2. Способы разработки месторождений
 3. Природные особенности окружающей среды и основные источники загрязняющих веществ в горнорудных районах
 4. Техногенные преобразования горнорудных территорий
 - 4.1 Преобразование наземных систем
 - 4.2 Преобразование водных систем
 - 4.3 Формирование региональных зон техногенного загрязнения
 5. Выводы
- Литература

1. Общая характеристика масштабов техногенного воздействия в горнорудных районах

Горнорудные территории, в пределах которых распространены месторождения цветных (меди, цинка, никеля, свинца) и редких (обычно попутных полезных компонентов) металлов (олова, вольфрама, молибдена, ко-

бальта и др.), во многих случаях являются наиболее старыми районами горнодобывающей промышленности и нередко территориями особенно активного техногенного (прежде всего, геохимического) преобразования окружающей среды, что, прежде всего, обусловлено резкой интенсификацией процессов литогенеза и интенсивным загрязнением окружающей среды химическими элементами и их соединениями. «Рудная деятельность человечества, – подчеркнул В.И. Вернадский, – является одним из больших биогеохимических процессов современной эпохи и вносит новое в геохимию всех химических элементов» [20, с. 229]. Техногенные преобразования в горнорудных районах захватывают территории, многократно превышающие площади горных (земельных) отводов, проявляются в глубокой трансформации химического состава практически всех компонентов биосферы и являются главным фактором, сдерживающим социально-экономическое развитие данных регионов. Максимальная глубина известных карьеров достигает 1 км и более, шахт – 4 км, скважин – 7 км. Размеры зон влияния эксплуатируемых рудных месторождений на прилегающие территории составляют десятки, часто сотни квадратных километров (в исключительных случаях – тысячи квадратных километров); радиус образующихся при осушении месторождений депрессионных воронок достигает десятки километров (при понижении напоров, измеряемых иногда сотнями метров); техногенные геохимические аномалии в поверхностных водоотоках прослеживаются на многие десятки километров. Например, в Хабаровском крае общее извлечение шахтно-рудничных подземных вод только в 2015 г. составило 14954,2 тыс. м³ [34]. На территории Свердловской области в пределах Североуральского бокситового рудника сформировавшаяся в процессе многолетнего водоотлива депрессионная воронка в рифейско-нижнедевонских и рифейско-нижнекаменноугольных водоносных комплексах занимает площадь около 350 км², с максимальной глубиной депрессионной поверхности в центральной части разрабатываемых месторождений около 700 м [32].

В отвалы и хвостохранилища горнорудных предприятий ежегодно поступают миллиарды кубических метров вскрышных пород, отходов добычи и обогащения руд. Из шахт, с рудников и обогатительных фабрик отводятся и сбрасываются в поверхностные водные объекты значительные объемы сточных вод, содержащих взвешенные вещества, разнообразные органические и неорганические вещества. В атмосферу поступают огромные количества пыли, различных газов, химических элементов и их соединений. В большинстве случаев степень извлечения полезных компонентов из руд относительно невелика. Часто из них извлекается только 1–3 компонента при содержании в рудах в несколько раз большего числа потенциально полезных компонентов (и являющихся, нередко, опасными загрязняющими веществами). Так, по оценкам ИПКОН РАН [61], доля недоизвлеченных из исходных руд цветных металлов составляет (в %): Си 15–25, Zn 26–47, Ni 10–25, Pb 25–39, Mo 19–23, Sn 35–58, W 35–50. Эти потери, связанные преимущественно с несовершенством обогатительных технологий, обусловили накопление в отходах цветной металлургии на начало 2000-х гг. огромные массы металлов (в тыс. т): 9000 Zn, 2480 Ni, 980 Pb, 114 Mo, 540 Sn, 129 W. Согласно [32], недостаточная комплексность добычи и переработки полезных ископаемых приводит к потерям до 30% и более учтенных в недрах запасов. По данным на 2016 г. потери при добыче (от погашенных запасов) составляли: железные руды – 3,8%, хромовые руды – 7,5, медные руды – 3,5, свинцово-цинковые руды – 4,4, вольфрамо-молибденовые руды – 4,1, оловянные руды – 6,5, калийные соли – 61,4, апатито-нефелиновые ру-

ды – 11%; при обогащении руд: железо – 26,5%, медь – 18, свинец – 24,5, цинк – 40,2, никель – 16,7, вольфрам – 11,9, оксид калия – 13,2, пентоксид фосфора из фосфорных руд – 10, аптитовый концентрат из комплексных железных руд – 33%. В отвалах предприятий разубоживаются и безвозвратно теряются многие ценные компоненты, содержащиеся в добываемых рудах. Необходимо отметить, что техногенное воздействие достаточно активно проявляется уже на этапах поисков и разведки месторождений [130].

В табл. 1 приведены данные, характеризующие добычу из недр цветных и редких металлов в России в 2015 г. Как видим, наиболее масштабной (сотни тысяч тонн) была рудная добыча «классических» цветных металлов – меди, цинка, никеля и свинца, извлечение из недр других металлов была намного меньше.

Таблица 1

Добыча цветных и редких металлов из недр в России в 2015 г. [30]

Металл	Добыча, тыс. т
Медь	870,1
Цинк	388,8
Никель	309,4
Свинец	171,2
Молибден	4,756
Вольфрам (по WO ₃)	4,114
Олово	1,633

2. Способы разработки месторождений

В зависимости от условий залегания рудных месторождений и мощности залежей разработка осуществляется открытым, подземным или комбинированным открыто-подземным способами. По отдаленным видам руд используются скважинные технологии [14, 27, 47, 58, 102]. К преимуществам открытого способа добычи относятся: уровень комплексной механизации и автоматизации горных работ обеспечивает большую производительность труда и меньшие затраты на добычу полезного ископаемого; более безопасные и комфортные условия труда; более полное извлечение полезного ископаемого; меньшие удельные капитальные затраты на строительство. Недостатки открытого способа: необходимость выемки значительно превышающих объем руды вскрышных пород, затраты на что составляют основную часть общих затрат; необходимость изъятия из пользования значительных площадей земли и изменение ландшафта; изменение гидрологической ситуации в районе добычных работ. При подземном способе разработки объемы перемещаемых пустых пород по сравнению с открытым способом незначительны и требуют меньших площадей для их размещения. Обеспечивается сохранность земной поверхности. Преимущества скважинных технологий заключаются в возможности вскрытия запасов руд для безлюдной отработки в короткое время при сравнительно небольших затратах и минимальном риске в любых горно-геологических условиях. К недостаткам можно отнести ограниченность применения рудами со специфическими условиями оруденения и вскрытия, например, растворимых солей, меди,

золота, урана. Комбинированным способом разрабатывают мощные крутопадающие месторождения с выходом на земную поверхность.

Открытая разработка месторождения включает в себя: подготовку поверхности, осушение месторождения, горно-капитальные работы по вскрытию и подготовке к добыче, в том числе, вскрытие путем удаления вмещающих руду пустых пород и добычные работы. Основные процессы открытых горных работ: снятие почвы, вскрытие рудного тела, отделение руды от массива, транспортировка, первичная подготовка, складирование пород и некондиционного сырья. Система разработки называется сплошной, если горно-подготовительные работы отсутствуют. При транспортной системе разработки вскрышных работ порода перемещается сначала во внешний отвал, а по мере развития горных работ – во внутренний отвал. Буровзрывные работы при открытой разработке имеют целью подготовку скального массива к экскавации. Расчет параметров взрывания базируется на зависимости разрушенного объема породы от массы заряда взрывчатого вещества. Свойства массива учитываются через удельный расход взрывчатого вещества, величина которого регламентируется. В большинстве случаев буровзрывное рыхление массива основано на расположении взрывчатого вещества в скважинах, пробуренных буровыми станками. Открытым способом, например, разрабатывают Удаканское месторождение (Забайкальский край), Буруктальское (Оренбургская область), Горевское (Красноярский край), Комсомольское (Оренбургская область), Одинокое (Республика Саха (Якутия), Лермонтовское (Приморский край), Сорское (Республика Хакасия) и др.

Подземная разработка месторождений руд цветных металлов различных форм, мощности, углов падения, на разных глубинах осуществляется с использованием подземных горных выработок. Она включает этапы: вскрытие, подготовка и очистная выемка, которые выполняются последовательно или совмещенно во времени и пространстве с целью обеспечения производства достаточными запасами вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов полезного ископаемого. Подземным способом разрабатываются, например, следующие месторождения: Октябрьское (Красноярский край), Талнахское (Красноярский край), Холоднинское (Республика Бурятия), Гайское (Оренбургская область), Фестивальное (Хабаровский край), Холтосонское (Республика Бурятия) и др. Большинство крупных предприятий Сибири и Дальнего Востока ведут добычу руд на глубинах свыше 500 м, на месторождениях Норильского промышленного района отработка запасов ведется на глубине до 1,5 км, Горной Шории – в среднем на глубине 900 м. В Канаде добычу руд, содержащих медь и никель, ведут на глубинах 1800–2600 м; в США извлечение – на глубинах от 1700 до 3000 м

Основные горные выработки:

- шахтные стволы, квершлагги и штольни, открывающие доступ ко всему месторождению или его части и обеспечивающие возможность проведения подготовительных выработок и очистной выемки в запланированных объемах;

- штреки, квершлагги, уклоны, бремсберги, восстающие, орты, которыми вскрытая часть месторождения разделяется на обособленные выемочные участки, предусмотренные принятым способом подготовки и системой разработки;

- подэтажные и словые выработки, выработки буровые, погрузочно-доставочные, подсечки, вентиляционные, отрезные восстающие, лавы и другие забойные выработки, обеспечивающие выемку полезных ископаемых.

Этапы подземной разработки: подготовка рудничного поля, отделение горной массы от массива, выдача на транспортные выработки и транспортирование на поверхность с размещением пород в выработанном простран-

стве или в отвалах. Месторождения склонных к растворению реагентами руд разрабатывают системами с выщелачиванием, комбинируя технологии по признаку максимального извлечения металлов [47].

Необходимо отметить, что многие современные ГОКи, занимающиеся добычей и обогащением руд цветных металлов, представляют собой сложные по функциональной структуре предприятия. Например, Учалинский ГОК, который является крупным предприятием Российской Федерации по добыче и обогащению (производит медный и цинковый концентраты, серный флотационный колчедан) медно-колчеданных руд. Его основными участками являются [39]: Учалинский рудник – рудник по добыче медно-цинковой руды подземным и открытым способом (Республика Башкортостан, г. Учалы), Юлдашевский карьер по добыче известняка (Учалинский район); Узельгинский подземный рудник с участком Молодежный (Челябинская область), Учалинская обогатительная фабрика для переработки медно-цинковой руды, железнодорожный цех, автотранспортное предприятие и другие структурные подразделения. В 2015 г. было добыто 7787,1 тыс. т и переработано 7840,6 тыс. т медной и медно-цинковой руды. Объем валового выброса загрязняющих веществ в атмосферу от объектов Учалинского ГОКа составил 1682 тыс. т (в 2014 г. – 1134 тыс. т). В 2015 г. здесь образовалось более 8,3 млн. т отходов. Вклад всех предприятий, осуществляющих добычу полезных ископаемых в Республике Башкортостан, в 2015 г. составил 17,107 млн. т, или 85,86% от суммарного количества отходов по Республике. К настоящему времени в Республике Башкортостан уже накоплено более 1,25 млрд. т отходов горнорудной промышленности, требующих дальнейшей переработки.

В общем случае в горнорудных районах в пространственном отношении рационально различать зону непосредственного воздействия месторождения на окружающую среду и зону внешнего влияния, в пределах которых (при хозяйственном освоении) существуют два типа геохимических аномалий (или, с утилитарной точки зрения, зон загрязнения) [120, 123, 128]: природные (рудогенные) аномалии, обусловленные естественными процессами, и техногенные аномалии, связанные с основными видами производственной деятельности: геологоразведочными работами, горнорудными работами (добыча руд), горно-обогатительными (обогащение руд) работами, иногда с металлургическим (или химическим) переделом руд, а также с сопутствующей хозяйственно-бытовой деятельностью.

3. Природные особенности окружающей среды и основные источники загрязняющих веществ в горнорудных районах

Природная специфика состояния окружающей среды в районах рудных месторождений в общем случае зависит от геолого-геохимических особенностей последних, проявляющихся различием ассоциаций химических элементов в миграционных цепях, формирующих природные геохимические аномалии. Степень экологической опасности природных миграционных цепей определяется видом, минералого-геохимическим классом и минеральным типом полезного ископаемого, коэффициентом рудоносности, интенсивностью проявления первичных ореолов, характером эрозийного среза рудных полей и месторождений, ландшафтно-геохимическими условиями развития геохимических ореолов и потоков рассеяния. В потенциале практически любое рудное месторождение представляет собой комплекс-

ный источник химического загрязнения окружающей среды, что в существенной мере связано с присутствием в рудах и вмещающих горных породах повышенных концентраций широкого комплекса химических элементов. Комплексность месторождений как источников загрязнения проявляется также в разнообразии охватываемых химическим загрязнением природных компонентов [84, 86, 87, 120, 127, 129].

Основными природными источниками загрязняющих веществ в горно-рудных районах являются руды, а также рудовмещающие породы, в которых формируются первичные геохимические ореолы, причем пространственные размеры последних и количество (масса) заключенных в них химических элементов, как правило, превышают аналогичные параметры рудных тел, вокруг которых они образуются [8, 36]. Обычно в состав первичных ореолов входят как главные рудные компоненты, определяющие промышленный тип месторождения, так и ряд сопутствующих химических элементов (табл. 2, 3).

Геохимические ассоциации, характерные для руд и первичных ореолов, в качественном отношении изучены еще недостаточно полно, так как были ориентированы главным образом на перечень элементов, используемых в качестве индикаторов при поисках месторождений. В большинстве случаев рассматриваются химические элементы, ореолы которых удавалось обнаружить, применяя экспрессный спектральный анализ. В то же время еще Н.И. Сафронов [90] указывал на присутствие (в повышенных количествах) в первичных ореолах постмагматических месторождений практически всех 58 главных рудообразующих и сопутствующих элементов. Исследования Э.Н. Баранова [8] показали, что, например, в рудах колчеданных месторождений, помимо основных рудообразующих элементов (Fe, S, Cu, Zn, Pb, Ba), постоянно присутствуют в повышенных концентрациях элементы-примеси (Au, Ag, As, Sb, Cd, Hg, Bi, Sn, Se, Te, Ge, Ga, Tl, In, Mo, Co). Ореолы около колчеданных месторождений образуют также элементы-примеси вмещающих пород (Mn, Ni, V, Cr, Ti, Sc, Sr) и элементы широкого рассеяния (J, W, Cl, F). В увеличенных количествах в околорудных измененных породах могут находиться и породообразующие элементы (K, Na, Ca, Mg, P). В целом в формировании элементного состава эндогенных геохимических ореолов колчеданных месторождений участвует по меньшей мере 47 химических элементов. По данным [45], в исследованных ими образцах сульфидных рудах Учалинского медно-колчеданного месторождения установлены, кроме отмеченных в Таблице элементов, высокие концентрации мышьяка (400–1500 мг/кг), селена (до 300), никеля (до 100), а также хрома и марганца; содержания серы составляло 30–42%, железа – 24–36%. Аналогичная полиэлементность состава установлена для ореолов многих других типов месторождений. Лишь в редких случаях встречается ограниченная группа месторождений, вблизи которых геохимические ореолы практически отсутствуют или проявлены слабо.

Очень показательным концентрированием в рудах и рудовмещающих породах многих месторождений (колчеданных, полиметаллических, медных, золотосеребряных и др.) такого токсичного элемента, как ртуть [8, 13, 16, 108, 109] (табл. 4). Например, высокие содержания ртути, обуславливающие необходимость попутного извлечения ее при металлургическом переработке, обнаружены в цинковых концентратах, получаемых из руд медно-колчеданных месторождений Урала (концентрации ртути в пределах 20–93 мг/кг) [68].

Геохимические ассоциации элементов, концентрирующихся в некоторых типах рудных месторождений и сопровождающих их ореолах рассеяния [36]

Тип месторождения	Геохимическая ассоциация
Апатитовые	P-Sr-Ce-La-Y-Yb-Zr-Nb-Mo-Pb-Ba-Sn-Ni-Co-Zn-Cr-V-Sc-Ga-Mn
Кимберлиты	Co-Ni-Cr-Pb-Zn-Ag-Cu-B-Mo-Sn
Редкометалльные пегматиты	Li-Pb-Cs-Nb-Sn-Ta-W-Be-As
Медно-никелевые	Cu-Ni-Co-Ba-Pb-Zn-Ag-Bi-Sn-Be-W-Zr
Медно-колчеданные	Ba-Ag-Pb-Cd-Zn-Bi-Cu-Co-Mo
Железорудные в скарнах	Mn-Pb-Cu-Zn-Ni-V-Sn-Sr-B-Zr-Mo-Co-Fe-Ti-Cr-Y-Sc
Вольфрам-молибденовые в скарнах	Ba-Ag-Pb-Zn-Sn-Cu-W-Mo-Co-Ni-Be-V-Y
Висмутовые в скарнах	As-Pb-Ag-Zn-Co-Cu-Bi-Ni
Оловорудные	Sn-Pb-As-Cu-Bi-Zn-Ag-Mo-Co-Ni-W
Полиметаллические в скарнах	Sb-Cd-Ag-Pb-Zn-Cu-Ni-Bi-Co-Mo-Sn-W-Be
Золоторудные	Au-Sb-As-Ag-Pb-Zn-Mo-Cu-Bi-Co-Ni-W-Be
Медно-порфировые	Ba-As-Sb-Ag-Pb-Zn-Au-Bi-Cu-Mo-Sn-Co-W-Be
Медные	Ba-As-Pb-Zn-Ag-Sn-Cu-Bi-Co-Ni-Mo
Медно-молибденовые	Cu-Mo-As-Ag-Pb-Zn-Bi-Co-Ni-Be-W
Полиметаллические	Ba-Sb-As-Ag-Pb-Zn-Cu-Bi-Mo-Co-Sn-W
Урановые	U-Ag-Pb-Zn-Cu-Mo-Co-Ni-Y
Сульфидно-ртутные	Sb-Hg-As-Cu-Ag-Pb-Zn-Be-Co-Ni-W-Sn
Ртутные	Hg-Ba-Ag-Pb-Zn-Cu-Co-Ni-Sn-Mo-W
Стратиформные свинцово-цинковые	Ba-As-Cu-Ag-Pb-Zn-Co-Ni-Be-V
Медистые песчаники	Cu-Ag-Pb-Ba-Bi-W-Cr-Zn-Mo

Ассоциации наиболее распространенных элементов-спутников различных руд [70]

Главный металл	Элементы-спутники
Fe	Mn-Ti-V-Co-Pt-Cu-Zn-S-P-As-Pb-Ga-Ge-B-Ni-Cr
Cu	Au-Ag-Se-Tl-Re-Co-Mo-Pb-Zn-Ge-Cd-In-As-Sn-Bi-Hg-Ni
Pb	Zn-Cu-Sn-Ag-Au-Bi-Sb-As-Se-Tl-Cd-In-Ge-Ga-Hg-Co-Ba
Zn	Pb-Cu-Sn-Ag-Bi-Sb-As-Tl-Se-Te-Ge-Au-Co-Cd-Ni-In-Hg-Ba-Ga
Ni	Co-Cu-Pt-Pd-Ir-Rh-Os-Ru-Au-Ag-Se-Te
Sn	Cu-Pb-Bi-Ag-Hg-Ta-Nb-In-Sc-W-Se-Tl-As-Zn-Co-Cd-Mo
Al	V-Ti-Ga-Cr-Mn-P-F-Nb-Zr-La-As-U-Th
Ti	V-Cu-Co-Pb-Zn-Cr-Mn-P
Mo	W-Sn-U-Cu-Zn-Pb-Re-Mn-Ge-Te-Se-Tl-In-As-Sb-Bi-Ag-Au-Co-Cd-Hg-Th-Gd-Yb-Y-Ce-Sm-Eu-Nd-La-Ni-Nb-Ta
W	Mo-Mn-Bi-Au-Cu-Zn-As-Pb-Tl-Se-Ag-Sc
Ta, Nb	W-Sn-Li-Be-Zr-Cs-Rb-In-Sc-Hg-Ag-Bi-Pb-Cu
Tr	Ta-Nb-Ti-U-Th-Hf-Zr-Y
Mn	Fe-Cu-Ni-Co-V-Cr-P-Pb-Zn-As-Ba-Ag-Sb
Cr	P-Ni-V-Co-Mn-Ti

Масштабы ртутноносности различных месторождений [13]

Тип месторождения, тип и сорт руды	Ртутноносность, г
Медно-колчеданный, медно-цинковые	n:1000
Медно-порфировый, молибдено-медные	n:10
Медистые песчаники, существенно медные	n:10
Медно-никелевый	n:10
Стратиформный, свинцово-цинковые баритсодержащие	n:1000
Колчеданно-полиметаллические, медно-свинцово-цинковые	n:10
Скарновый и метасоматический, свинцово-цинковые	n:10
Жильный, свинцово-цинковые	n:10
Бокситовый	n:10
Алунитовый	n:10
Железорудный	n:10

В процессе переработки медно-колчеданных руд на Учалинском ГОКе происходит перераспределение ртути, в результате чего 95–98% общего количества ее в составе концентратов уходит на металлургические заводы (табл. 5). Ртуть содержится в окисленных рудах медно-колчеданных месторождений Южного Урала, из которых в течение 50 лет на Семеновской золоизвлекательной фабрике получают цианированным золотом и серебро [68]. По данным авторов цитируемой работы, концентрация Hg в материале хвостохранилищ фабрики варьируются в пределах 8,8–67,8 мг/кг, а ее общая масса оценивается в 60 т. В рудах месторождений золотосеребряной формации Северо-Востока России также отмечены высокие концентрации этого металла (от 8,1 мг/кг для месторождения Карамкен до 75 мг/кг для месторождения Валунистое) [91]. В Казахстане при переработке полиметаллических руд месторождений Рудного Алтая (Риддер-Сокольного, Зырянского и др.) и центральных районов страны (Жайремского, Кайгарлинского и др.) терялось до 50 т ртути в год [66]. Очень высокими концентрациями ртути в различных компонентах окружающей среды отличаются районы добычи и производства этого металла [121].

Таблица 5

Распределение ртути в рудах и продуктах их переработки [22]

Фракция	Hg, мг/кг (среднее)	Относительное количество Hg, %
Руда	10–25	100
Медный концентрат	28–41	10–14
Цинковый концентрат	76–123	35–48
Пиритный концентрат	5–15	36–50
Хвосты	1–9	2–5

Как известно, добыча редких металлов ведется в основном попутно, поскольку большинство из них рассеяны в земной коре, а в рудном сырье они сопутствуют базовым металлам. Некоторые из редких металлов являются радиоактивными, а другие могут сопровождаться в минеральном сырье и продуктах его переработки радиоактивными элементами, что связано с необходимостью оценки уровней радиоактивности и соответствующей классификации по радиационной опасности как самих руд, так и продуктов их передела. Именно поэтому одним из важным факторов работы с редкометалльным сырьем на многих месторождениях как в России, так и за рубежом, является высокая радиоактивность руд, которая связана с присутствием значительных количеств радиоактивных элементов [71].

Особую группу поллютантов составляют органические соединения, присутствующие в рудах и рудовмещающих породах. Органические соединения обнаружены более чем в 80 видах твердых полезных ископаемых. Они встречаются в рудах и минералах полиметаллических, золоторудных, ртутных, ртутно-сурьмяных, ртутно-вольфрамовых, оловорудных, флюоритовых, пегматитовых месторождений [17–19, 24, 75]. Всего к настоящему времени в рудах различных месторождений выявлено свыше 120 индивидуальных органических соединений. Достаточно надежно идентифицированы: 1) предельные и непредельные углеводороды (метан, этилен, пропилен,

бутулен, амилен, гексан, гептан, октан и др.), общее количество которых изменяется в пределах от 0,2 до 7,8 см³/кг породы; 2) полициклические ароматические углеводороды (бензпирен, нафталин, флуорантен и др.), общая концентрация их достигает 0,06–0,42 мг/кг; 3) амины (метиламин, делтиламин, этиламин и др.). Установлено также наличие гетероциклических соединений, аминов, цианидов, спиртобензолых смол, минералов группы парафинциклопарафинов. Практически во всех гидротермальных рудных образованиях, независимо от характера вмещающих пород и типа руд, обнаружены полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). В медно-колчеданных рудах, поступающих на Гайский ГОК, присутствуют битуминозные вещества (20–30 мг/кг) [11, 12]. В отходах обогащения содержание битумоидов возрастает до 360 – 550 мг/кг, что обусловлено как концентрированием в хвостах обогащения природной органики, так и использованием в технологических процессах химерагентов типа диоксановых спиртов, компоненты которых сорбируются мелкодисперсной фракцией отходов. Исходную руду и отходы отличает и качественный состав органики – природные битумоиды почти на 50% представлены углеводородами, а в хвостах обогащения явно доминируют фталаты и элементарная сера. При выщелачивании хвостов обогащения в водную фазу переходят все характерные для них геохимические маркеры. Уровень органического загрязнения стоков хвостохранилища характеризуется следующими параметрами: содержание битумоидов – 2,7–23,7 мг/дм³, нефтепродуктов – 0,7–2,1 мг/дм³. В составе аквабитумоидов зафиксирован широкий спектр поллютантов: элементарная сера и S-содержащая органика (тиолы и сульфоны – 0,02–6,4 мг/дм³), фталаты (до 5,2 мг/дм³), галогеналканы (до 4,9 мг/дм³), спирты, оксосоединения и кислоты ряда C₃–C₂₆ (до 0,8 мг/дм³). Углеводородные структуры водорастворимых комплексов занимают подчиненное положение и представлены алифатическими и галогенированными соединениями ряда C₇–C₄₄.

В разрезе зоны гипергенеза рудных месторождений четко прослеживается дифференциация ассоциаций химических элементов в зависимости от характера вертикального профиля коры выветривания, типа вмещающих пород и степени концентрации сульфидов [83]. Так, сравнение интенсивности процессов перераспределения элементов в горизонтах окислительного типа для ряда вмещающих пород «силикатные (кремнистый тип коры выветривания) – алюмосиликатные (глинистый тип коры) – карбонатные (карбонатно-глинистый тип коры)» показывает, что для руд и первичных ореолов существуют контрастные и однонаправленные тенденции в изменении характера перераспределения типоморфных элементов. В породах кремнистого состава при выветривании часто наблюдается резкая дифференциация в поведении химических элементов. Многие из них здесь миграционно подвижны и энергично выносятся (Zn, Co, Cu, Cd, Se – почти всегда, Pb, As – часто, но особенно при обилии пирита). Другие элементы (Mo, Ag, Ba) иногда накапливаются (с гидроксидами железа). В породах алюмосиликатного состава подвижность многих элементов уменьшается в связи с появлением сорбционного барьера. В условиях выветривания рудовмещающих пород даже Zn часто становится малоподвижным. В основном энергично выносятся только лишь аниогенные элементы (Se, Te). Однако уменьшение подвижности элементов наблюдается далеко не всегда, поскольку оно обусловлено временными соотношениями между процессами образования глинистых минералов и окислительным разрушением сульфидов. В породах карбонатно-глинистого состава тенденция уменьшения подвижности элементов проявлена особенно контрастно. Даже в условиях выветривания относи-

тельно богатых руд большинство химических элементов ведет себя сравнительно инертно.

В результате природных гипергенных процессов происходит разрушение рудных месторождений, обуславливающее перераспределение вещества руд и первичных ореолов в окружающем пространстве и приводящее к образованию вторичных геохимических ореолов (в почвах и рыхлых отложениях) и потоков рассеяния (в донных отложениях, взвеси и водах водотоков), которые часто блокируются в сближенные серии, характеризующие оруденение рудных полей, узлов и районов [37, 64, 65, 70, 79, 83, 103]. Обычно площади рудных полей колеблются от единиц квадратных километров до 20 км², в редких случаях достигая нескольких десятков квадратных километров. Площади месторождений в среднем на порядок меньше площадей рудных полей, а площади рудных тел – на порядки меньше площади месторождений. Площади аномальных геохимических полей, соответствующие потенциальным рудным полям, в среднем составляют 15–80 км² (изменяясь в пределах 8–180 км²). Минимальные площади (8–40 км²) характерны для аномальных геохимических полей грейзеновых, пегматитовых, кварцево-жильных рудных полей месторождений W, Au, Sb, Hg, Sn, а максимальные (10–180 км²) – для колчеданных, медно-порфировых, стратиформных и жильных полиметаллических, медно-никелевых, урановых, сурьмяно-ртутных. В большинстве случаев качественный состав аномальных геохимических полей, как правило, комплексный с преобладанием одного или нескольких основных рудообразующих элементов, которые наиболее широко распространены не только в центральных, но и в периферических частях выделяемых геохимических полей. Менее интенсивные, но относительно большие по размерам аномальные поля образуют химические элементы и соединения широкого рассеяния (ртуть, галогены, щелочные металлы, битумы). Например, площадь рудного поля одного из сульфидных месторождений составляет 250 км², из них на 120 км² концентрации Pb, Cu, Zn, Co, Mo в почвах превышают фоновые значения в 5–10 раз и на площади 25 км² – более чем в 10 раз [86]. Показательно, что из девяти населенных пунктов, расположенных в пределах данного рудного поля, семь находятся на территории с высокими содержаниями химических элементов в почвах. Для другого крупного региона развития сульфидно-касситеритовых месторождений по поисковым геохимическим данным выявлены три типа аномалий с весьма токсичным комплексом элементов в ассоциации: Hg, Pb, As, Zn, Cu, Sn, Sb, Mn. Общая площадь проявления геохимических аномалий в почвах составляет почти 5000 км², причем концентрации Pb достигают 0,1–0,5%, Hg – 0,001%.

Как правило, интенсивность концентрирования химических элементов в первичных ореолах выше (для многих элементов нередко существенно), нежели во вторичных ореолах (табл. 6, 7). Тем не менее в зависимости от характера поверхности и крутизны склонов горизонтальная протяженность вторичных ореолов может в 2–10 раз превышать размеры ореолов в коренном залегании, превышая для некоторых элементов 1 км [37].

Размеры и морфология вторичных геохимических ореолов, являющихся, в свою очередь, источниками поставки вещества для потоков рассеяния, а также средняя протяженность последних, их минимальная и максимальная длина для большинства рудных месторождений достаточно близки [37, 79, 83, 88, 103, 125]. Различия проявляются в качественном составе геохимических ассоциаций и интенсивности концентрирования химических элементов. В большинстве случаев вторичные геохимические ореолы и потоки

рассеяния характеризуются полиэлементным составом. Содержания химических элементов (рудообразующих и элементов-спутников) во вторичных ореолах и потоках рассеяния обычно не более чем в 10–15 раз превышает фоновые значения; лишь в центральных и очень локальных зонах ореолов (0,0*n* км²), непосредственно трассирующих рудные тела, интенсивность их концентрирования может быть существенно выше.

Таблица 6

Средняя интенсивность концентрирования (относительно местного фона) химических элементов в первичных и вторичных ореолах оловорудного месторождения штокверкового типа, расположенного в тундровом ландшафте зоны криогенеза [37]

Элемент	Первичные ореолы (П)	Вторичные ореолы (В)	Отношение (В) : (П)
Sn	120,5	151,5	1,26
W	89,7	84,2	0,94
As	51	40	0,78
Bi	12,6	3,5	0,28
Ag	28	9,8	0,35
Pb	4,	2,0	0,49
Zn	16,8	4	0,24
Co	4,8	1,1	0,23
Cu	2,6	1,3	0,50

Таблица 7

Средняя интенсивность концентрирования (относительно местного фона) химических элементов в первичных и вторичных ореолах полиметаллического месторождения, расположенного в горно-луговом ландшафте степной зоны, Северная Армения [37]

Элемент	Первичные ореолы (П)	Вторичные ореолы (В)	Отношение (В) : (П)
Ag	149	25	0,16
Pb	120	200	1,66
Cu	81	7,6	0,09
Zn	60	13,4	0,22
As	20	–	–
Cd	8,8	–	–
Bi	6	–	–
W	6	–	–
Co	4	1,2	0,30
Mo	2,2	1,2	0,54
Sn	1,9	2,5	1,31

Для рудогенных потоков рассеяния поставка химических элементов связывается с деятельностью эрозионных и склоновых процессов (в основном поступление механических продуктов разрушения руд, рудоносных пород, первичных и вторичных ореолов) и с выходом подземных вод (преимущественное поступление растворенных веществ). Интенсивность эрозионных и склоновых процессов зависит от физико-географических особенностей территории, что позволяет говорить о географической зональности постав-

ки твердых веществ в реки горнорудных районов. Обычно наблюдается относительно равномерное в разрезе года поступление растворенных веществ с грунтовыми и подземными водами. Поставка твердых веществ рас- пределена во времени неравномерно: до 70–99% годового твердого стока происходит в половодья и паводки. Состав ассоциаций элементов, накапливающихся в аллювии, хорошо коррелирует с минералого-геохимическими особенностями дренируемых месторождений [65, 77, 88, 141]. Особенности пространственного распределения элементов в потоках рассеяния (в аллювии) находятся в зависимости от положения рудопроявлений и месторождений в долине. Наиболее интенсивные аномалии обычно совпадают с участками рудопроявлений и месторождений. В пространственном плане характерно наличие 2-х участков – головной части (поставка рудного вещества) и шлейфа (перенос рудного материала) потока. Головная часть отличается резким, скачкообразным возрастанием концентраций элементов в отложениях с незакономерными их колебаниями. Протяженность ее зависит от размеров месторождений и положения русла по отношению к долине (табл. 8).

Таблица 8

Протяженность рудогенных потоков рассеяния различных химических, км [65]

Ag	Cu	Zn	Pb	Ni	V	Mo	Mn	As	W	Sn	Hg	Bi	Co	Y
<i>Крупное месторождение серебра</i>														
12	4	12	12	4	1	10	12	4	1,2	6	6	-	-	-
<i>Среднее месторождение серебра</i>														
8	2	8	8	-	-	8	8	6	1	2	-	-	-	-
<i>Мелкое месторождение серебра</i>														
3,2	0,5	0,25	2,8	0,7	-	3,2	2,5	3,2	0,25	0,2	-	-	-	-
<i>Чануанские оловорудный узел</i>														
10	10	10	5	-	-	6		10	1	10	-	10	10	2,5
<i>Пестринский рудный узел (месторождения касситерит силикатного типа)</i>														
14	14	14	14	-	-	6	6	14	8	14	-	14	-	-
<i>Месторождение Труд, касситерит-сульфидное (Северное Приохотье)</i>														
3	2	3	3	-	-	-	1	3	-	3	-	-	-	-
<i>Мраморный рудный узел, оловянно-порфиоровые месторождения</i>														
6	3	8	8	-	-	3	8	8	3	6	-	3	3	-
<i>Свинцово-цинковое жильное оруденение, участок Порожистый. Северное Приохотье</i>														
4,5	2	4,5	4,5	-	-	2	4,5	2,5	-	-	-	2	-	-
<i>Большетагинский массив редкоземельных карбонатов</i>														
-	0,7	1,51	-	-	9	9	6	-	0,3	-	-	-	2	-
<i>Большетагинское ниобий-апатит-флюоритовое месторождение в карбонатах</i>														
-	0,7	1,5	1	-	-	9	2	-	-	-	-	-	-	1,5
<i>Полиматаллические месторождения (Джунгарский Алатау, Тьжжол-Актобе)</i>														
2,7	-	2,6	4,6	-	-	2,5	-	2,5	-	-	-	-	-	-

В вертикальном разрезе потоки рассеяния отличаются развитием 2-х горизонтов – нижнего (образован аллювием более древних русел) и верхнего (современные отложения). Как правило, потоки рассеяния в действующих руслах находятся в тесном взаимодействии с потоками рассеяния в отложениях поймы. Имеются указания на развитие более контрастных потоков в грубообломочных отложениях, нежели в тонких фракциях горного аллювия [77, 143]. Очень часто формируются так называемые прерывистые потоки

рассеяния, характеризующиеся наличием нескольких экстремумов концентраций химических элементов, обусловленных несколькими причинами, основной из которых является неравномерность развития денудационных процессов [69]. По мере удаления от коренного источника взаимоотношения и характер корреляционных связей между содержаниями рудных элементов в русловых отложениях отличаются от характеристик коренного оруденения [65]. Наибольшая степень сходства обычно характерна для водотоков 1–2 порядков.

Важнейшими факторами, влияющими на формирование рудных биогеохимических аномалий, являются минеральные и химические формы рудных элементов в почвах, рыхлых породах и рудах, характер контакта между корнями растений и рудными ореолами, наличие физиологических барьеров поглощения у растений, масштаб оруденения [51]. Обычно площадь проявления биогеохимических аномалий близка размерам рудных тел и их литохимических ореолов. Влияние геохимических особенностей ландшафтов на интенсивность проявления биогеохимических аномалий, как правило, несущественно. Об этом говорит сопоставление биогеохимических аномалий над минерализацией близкого типа, наблюдаемых в различных районах (табл. 9). Наибольшее влияние данные особенности оказывают на величину фоновых содержаний элементов-индикаторов в растениях на дисперсию этих содержаний.

Рудные месторождения характеризуются присущими им гидрогеохимическими полями, в структуре которых различают области развития рудных вод (ареал) и ореольных вод (ореол) [35, 52, 54]. Рудные воды формируются в непосредственной близости от рудного тела (пространственно совпадают с источником рассеивающего вещества) и отличаются, как правило, законономерным и неупорядоченным по отношению к потоку подземных вод пространственным распределением рудных компонентов. Ореольные воды представляют часть гидрогеохимического поля за пределами источника рассеивающего вещества, внутри которого в соответствии со структурой потока происходит закономерное уменьшение содержаний элементов (пространство от границы рудных вод до фоновых). Гидрогеохимические поля рудных месторождений, рудные и ореольные воды практически всех известных типов рудных месторождений характеризуются повышенными концентрациями достаточно широкого комплекса макро- и микроэлементов, уровни которых могут заметно превышать фоновые концентрации (табл. 11–14).

В естественных условиях общий химический состав воды горных рек зависит от источников питания и во многом определяется типом слагающих водосборы горных пород (табл. 10). Как правило, минимум минерализации приурочен к сезонам таяния ледников и снегового покрова, максимум – к зимнему времени, когда в питании речного стока заметно преобладают грунтовые и подземные воды. Реки, дренирующие гранитные породы отличаются более низкой минерализацией, нежели реки, бассейны которых сложены известняками. Сланцевые водосборы занимают промежуточное положение.

Обычно протяженность гидрогеохимических ореолов и потоков рассеяния, формирующихся в окрестностях рудных месторождений, относительно невелика и составляет в пределах придолинного ландшафта первые сотни метров, реже 1–2 км, в пределах приводораздельных ландшафтов гумидного климата – 0,5–3 км, иногда до 5–8 км; в условиях аридного климата – обычно 0,5–2 км [52, 54]. Некоторые характеристики гидрогеохимических полей различных месторождений Якутии (зона мерзлоты) приведены в табл. 15.

Таблица 9

Интенсивность биогеохимических аномалий (ветки деревьев и кустарников, наземные части трав, зола) над рудными телами с открытыми литохимическими ореолами в различных ландшафтах [51]

Минеральный тип руд	Элемент	Фон и аномалия	Типы ландшафтов и концентрации элементов, 10 ⁻³ %					
			мерзлотно-таежный	лесной немерзлотный	степной	попустынный и попустынный		
Вольфрамитовый и шевелитовый	W	Фон	< 2	< 2	< 2	0,2-0,6		
		Аномалия	20-300	20-600	20-300	6-60		
Молибденитовый (с зонами окисления)	Mo	Фон	0,2-2,0	0,2-2,0	0,3-3,0	30-3,0		
		Аномалия	10-50	20-100	30-1000	30-1000		
Колчеданно-полиметаллический	Pb	Фон	0,3-3,0	0,3-3,0	1-10	1-10		
		Аномалия	30-10000	30-3000	100-5000	100-3000		
Медно-колчеданный	Zn	Фон	30-120	30-100	10-50	10-50		
		Аномалия	100-5000	200-3000	100-6000	100-2000		
	Cu	Фон	3-30	3-30	2-20	2-20		
		Аномалия	30-300	30-300	10-100	-		

Таблица 10

Химический состав рек бассейна Ардона (Северная Осетия), мг/л [80]

Компонент	Весна			Лето			Осень			Зима		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ca ²⁺	9,8	14,6	39,9	12,1	16,5	39,7	13,4	21,4	46,6	14,8	27,5	44
Mg ²⁺	1,0	3,1	6,1	1,0	3,7	9,9	0,9	4,2	3	2	5	13,3
Na ⁺ +K ⁺	3,0	5,5	3,8	1,4	3,4	5,3	3,7	5,2	9,5	5,5	9,1	11,6
HCO ₃ ⁻	28,7	49,9	131,3	30,5	48,1	133,7	34,8	74,8	159	52,8	79,1	183
SO ₄ ²⁻	9,1	15,3	17,9	8,8	17,3	32	11,9	14,6	17,9	18,9	38,3	34,5
Cl ⁻	1,9	2,7	3,1	2,2	3,6	7,9	2,8	3,8	2,3	0,9	3,2	2,1
Σ _и	45	73	137	45	80	175	71,1	97	170	78	147	202,5

Примечание. Породы, слагающие бассейн: 1 – граниты, 2 – сланцы, 3 – известняки.

Комплекс элементов, присутствующих в аномальных концентрациях в гидротермических полях некоторых рудных месторождений [52]

Месторождение	Специфические элементы в водах	Полный комплекс элементов в водах
Уран-редкометалльное	U-Sn	Al-Ti-V-Ga-Zr-Y-Yb-Be-Mo-F-Cl-Na-Cu-Zn-As-Sn
Кварц-золотое	Au-Ag	Ti-V-Ga-Zr-Be-Cu-Zn-Fe-Mn
Кварц-касситеритное	Sn	Al-Ti-V-Ga-Y-Yb-Mo-As-Zn
Урановое	U	Ti-V-Zr-Mo-F-Y-Zn
Касситерит-вольфрамитовое	Sn-W	Ti-V-Ga-Y-Be-Mo-Zn-Cu
Касситерит-шеллит-вольфрамитовое	Sn-W-Bi	Al-Ti-V-Ga-Zr-Sc-Cu
Касситерит-вольфрамитовое	Sn-W	Al-Ti-V-Ga-Zr-Be-Yb-Zn-Cu
Титано-магнетитовое	Ti-Fe-Cr-V	Al-Ga-Mg
Золотосеребряное	Au-Ag-K	Zn-Cu-As-Al-Ti-V-Ga-Y-Yb-Be
Сульфидные медно-никелевые	Co-Ni-Fe	Zn-Cu-As-Ti-Al-V-Ga-Cr-Mg

Таблица 12

Наиболее распространенные гидротермические поисковые ассоциации основных типов рудных месторождений [26]

Тип месторождения	Поисковая ассоциация	Сопутствующие элементы
Медноколчеданные (медные, медноцинковые)	Cu, Zn, Pb, As, Mo	Ca, Ni, Ag, B, F, Sc, Ge, U
Полиметаллические	Pb, Zn, Ag, Cu, Mo, Cd, Sb	Sn, Ni, Co, Sc, Ba, Sr, B, F, U
Медно-молибденовые (порфировые)	Mo, Cu, Ag	As, Zn, Co
Титано-магнетитовые	Ti, Fe	Ni, Co, Cr
Барито-халькопиритовые	Ba, Sr, Cu	Zn, Pb, As
Медно-никелевые	Ni, Cu, Zn, Co	Ba, Sn, Pb, U
Золоторудные	Au, Ag, Sb, As	Sn, Cu, Ni, Co, Pb, Mo
Оловорудные	Sn, Nb	W, Pb, Cu, Zn, Li, F
Ртутные, сурьмяно-ртутные	Hg, Sb, As	Ag, Se, Cu, Zn, B, F
Вольфрамо-молибденовые	W, Mo, Zn, Cu	F, Nb, TR, Be, Cu, Zn
Вольфрамо-касситеритовые	S, Sn	Nb, Sn, Cu, Zn
Вольфрамо-бериллиевые	W, Be, Li, F	Be, Cu, Zn, As, TR
Слодунено-лепидолитовые	Li, Rb, Cs, F, Sn, Nb	Li, Rb
Бериллиево-флюоритовые	Be, F	Be, Sn
Нибиево-танталовые	Nb, Tr, F, Li, Rb	

Таблица 13

Химический состав ореольных и фоновых вод в зоне окисления медно-висмутового месторождения,
Канимансур-Алмадонский разлом, г/л [37]

Компонент	Ореольные воды	Фоновые воды
pH	3,89	8,08
Минерализация	0,347	0,298
HCO ₃ ⁻	0,007	0,2
SO ₄ ²⁻	0,23	0,032
Cl ⁻	0,01	0,08
Ca ²⁺	0,038	0,057
Mg ²⁺	0,001	0,01
Na ⁺ + K ⁺	0,67	0,11

Таблица 14

Химические элементы в рудных и ореольных водах золотосеребряных гидротермальных вулканогенных месторождений
Северо-Востока и Дальнего Востока России, мкг/л [52]

Компонент	Рудные воды г	Ореольные воды г x 10 ⁻²	Фоновые воды
Золото	до 5	0,07	< 0,005
Серебро	10–30	0,3–0,5	0,01
Цинк	1–5	п x 10 ⁻¹	< 0,1
Медь	1–10	1–2	0,1–0,2
Мышьяк	20–100	25–30	0,5
Марганец	1–5	0,5	1–3
Кобальт	20000–100000	12000–16000	< 0,5
Сульфат-ион	100–500	100–200	1000–2000
Титан	1000–10000	3000	20–70
Алюминий	0,3–1	0,3	100–300
Галлий	0,1–1	0,1–0,2	< 0,3
Бериллий	0,5–3	0,5	< 0,1
Ванадий	1500–2000	до 2000	< 0,5
Калий			100–400

Основные гидрогеохимические признаки рудных месторождений Якутии
(по В.М. Макарову, цит. по [52])

Месторождения	Прямые признаки	Косвенные признаки	Характеристика ореолов и потоков рассеяния
Золоторудные: Плещеобразные залежи окисленных руд в карстовых депрессиях Круглопадающие жилы и сопряженные с ними субгоризонтальные залежи полисульфидного и пирит-анкеритового составов	Au Au	Ag, Mn, Sb, Sn, Ti, Be, SO ₄ ²⁻ Zn, Pb, Ag, Sn, Mo, Be, SO ₄ ²⁻	Площадь ореолов до первых десятков кв. км Протяженность потоков 0,4-8, 1 км
Золотосурьмяные: Зоны дробления с золотосодержащими кварц-антимонитовыми жилами, линзами, гнездами	Sb, Au	As, Hg, Co, Ga, Pb, Ge, SO ₄ ²⁻	Площадь ореолов до первых десятков кв. км, протяженность потоков 0,4 км
Оловорудные: Сульфидно-касситеритовые Оловянно-редкометалльные	Sn Sn, Li	As, B, F, Pb, Zn, Hg, Cu, SO ₄ ²⁻ As, Bi, Ag, Be, P	Площадь ореолов – первые кв. км, протяженность потоков до 1 км Протяженность потоков – первые километры
Медно-вольфрамовые и вольфрамовые	W, Sn, Cu	As, Zn, В, Co, Be, Ba	Протяженность потоков – первые километры
Полиметаллические	Pb, Ag, Zn	Sn, Cd, Cu, As, Hg, Ge, SO ₄ ²⁻	Площадь ореолов 1–6 км ² ; протяженность потоков 1–4 км
Ртутные	Hg	Sb, As, Ba, SO ₄ ²⁻	Протяженность потоков до 1 км
Медно-никелевые	Cu, Ni	Ti, Mn, Zn, Cr, Ag, V, Pb, Co, Zr, Sn	Протяженность потоков 0,5–1 км
Алмазные (кимберлитовые трубки в карбонатных породах)		Nb, Cr, Mn, Ti, V, Ag, As, Ga, Co	Слабоконтрастные прерывистые ореолы площадью (0,1–1)л км ²

По выраженности элементов в гидрогеохимических полях и пространственным характеристикам ореолов они близки используемым в сравнительном анализе месторождениям, расположенным за пределами зоны мерзлоты. Корреляционный анализ показал, что в гидрогеохимических полях формируются характерные для данных типов руд парагенетические группы независимо от того, находятся месторождения в зоне криогенеза или вне ее [52].

Наиболее интенсивные водные ореолы отмечаются при окислении сульфидных (колчеданных) руд, обогащенных дисульфидами железа, залегающих выше местного базиса эрозии в зоне активного водообмена [10]. При наличии в водах достаточного количества растворимого кислорода происходит интенсивное окисление пирита и пирротина с образованием свободной серной кислоты, понижающей рН вод, сульфатов железа и ионов серы различной валентности. Свободная серная кислота образуется также при окислении халькозина, арсенопирита, буланжерита, энаргита. Кислые сульфатные воды (рН 1–4) воздействуют на руды и вмещающие породы и обогащаются рудогенными элементами, а также солями алюминия, железа, кальция, натрия, магния и др. В кислых рудных водах (рН < 4) резко увеличиваются концентрации меди, цинка, свинца, мышьяка, кобальта, никеля.

Материалы, систематизированные В.В. Поликарпочкиным [77], свидетельствуют об относительно незначительной длине рудогенных водных потоков рассеяния в поверхностных водоотоках: обычно от первых сотен метров до первых километров, в редких случаях до 13–17 км. Необходимо отметить, что известны достаточно обширные по площади территории, в пределах которых в поверхностных водах стабильно фиксируются повышенные содержания многих химических элементов и их соединений, обусловленные влиянием различных природных (естественных) факторов [135, 136].

В общем случае возможности миграции химических элементов в природных водах рудных месторождений зависят, во-первых, от внутреннего строения элемента (структуры электронной оболочки и параметров, ее определяющих); во-вторых, от внешних физико-химических условий, создаваемых в водах того или иного типа рудного месторождения. Эти условия в существенной мере определяются (при их неразрывности) [52]: 1) окислительно-восстановительным потенциалом в гидрогеохимических полях рудных месторождений, обуславливающих валентное состояние элементов; 2) кислотно-щелочными параметрами, создаваемыми в водах рудами и вмещающими породами и являющимися второй основной координатой состояния элемента в природных растворах; 3) видом лигандов, обуславливающего основной процесс комплексообразования компонентов в природных растворах и определяющего интенсивность их миграции (карбонатность, фторидность, сульфатность вод и т. д.). Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) в водах рудных месторождений играет весьма значительную роль в миграции химических элементов, определяя валентное состояние элемента, а следовательно, все дальнейшие свойства, способствующие или, наоборот, препятствующие миграции его в зоне гипергенеза. Как показано Б.А. Колотовым [52], наиболее высокий ОВП в пределах 0,6–0,8 В (редко выше) формируется на сульфидных месторождениях (колчеданных, ликвационных, гидротермальных сульфидного парагенезиса и т. д.); ОВП понижается до 0,3 В на месторождениях с вмещающими алюмосиликатными и карбонатными породами; его наиболее низкие значения (0,1–0,3 В) наблюдаются на месторождениях с вмещающими породами или рудной массой щелочного состава. Заметное влияние на миграцию элементов оказывают кислотно-щелочные условия в гидрогеохимических полях рудных месторождений (табл. 16).

Группировка pH-задающих систем природных вод рудных месторождений, по [52]

Система	pH	Характеристика	Месторождения
Кислотная	< 2	Присутствует свободная кислота, pH задается двойными сульфидными во внутрирудном пространстве и в рудных водах	Колчеданные и реже ливкационные
Гидролизная	2–5	Определяется наличием минералов, представляющих соль катионов слабых оснований и анионов сильных кислот, иногда сульфидами	Гидротермальные плутогенные сульфидного парагенезиса, гидротермальные вулканогенного и телетермального классов, скрановые; ороленные воды колчеданных и ливкационных месторождений
Буферная	5–8,5	Обусловливается в основном карбонатным равновесием; pH вод, находящихся постоянно в контакте с атмосферой, сдвигается в кислую сторону, контактирующих с карбонатными породами, – в щелочную	Наибольшее количество типов рудных месторождений и фоновые воды; гидротермальные плутогенные руды кварцевые и карбонатного парагенезисов, скрановые, пегматитовые, альбитит-грейзеновые, грейзеновые, карбонатитовые, раннемагматические
Гидролизная	8,5–12,5	Гидролиз минералов, содержащих соли сильных оснований и слабых кислот; pH задается рудной массой, состоящей из щелочных пород	Позднемагматические

Группировка рудных месторождений по геохимическим обстановкам в рудных водах

Группа	Месторождения	pH	Eh	Характеристика ГХП
1-я	Колчеданные, пиквасионные	от 2 до 5	450–500 мВ и выше	Наличие дисульфидов (их окисление)
2-я	Сульфидные	4,5–6,5	не более 450 мВ	Моносульфиды, дисульфиды ограничены
3-я	Гидротермальные плутогенного класса кварцевого парагенезиса, альбитит-трейзенные, грейзеновые, пепматитовые, раннемагматические	5,5–7,3	200 – 400 мВ, изредка выше	Наличие неактивных пород, особенно алюмосиликатного состава, гидролиз алюмосиликатов, присутствие растворенного атмосферного кислорода
4-я	Гидротермальные плутогенные карбонатного генезиса, карбонатитовые	от 7,2 до 8, изредка выше	100–300 мВ	Наличие карбонатов
5-я	Позднемагматические апатитовые и редкоземельные, связанные с нефелиновыми сиенитами	8–12	100 – 200 мВ	Наличие щелочных пород

Тем не менее для многих химических элементов существуют два максимума накопления концентраций: один в кислых, чаще всего в виде катионов, а другой – в щелочных водах в виде анионов. В кислых водах, формирующихся в зонах окисления сульфидных месторождений (колчеданных, ликвационных, скарновых, гидротермальных плутогенных сульфидного парагенезиса, гидротермальных вулканогенных), рудные элементы накапливаются в результате: 1) диссоциации солей слабых оснований и сильных кислот (накопление Zn, Cu, Pb, As, Ag, Sn, Hg, Cd, Co, Ni, Fe и других, а также сульфат-иона) с последующим переходом к сульфидным комплексам; 2) диссоциации слабых кислот типа мышьяковой, вольфрамовой, молибденовой [52]. В щелочных средах (в водах месторождений при наличии щелочных пород) накапливаются элементы, участвующие в формировании и последующей диссоциации солей сильных оснований (чаще всего натрия) и слабых кислородных кислот, основу кислотных остатков которых составляют и рудные элементы. Однако основной тенденцией формирования устойчивых миграционных состояния элементов является здесь формирование комплексных соединений, поскольку в водах этих месторождений накапливается достаточное количество разнообразных лигандов (карбоната, фтора, гидроксоионов, органических веществ). Тенденция к образованию комплексных соединений наблюдается для элементов-комплексобразователей уже при переходе от кислых вод сульфидных месторождений к околонейтральным водам месторождений, руды и вмещающие породы которых относятся к типу неактивных по отношению к изменению pH (гидротермальные плутогенные кварцевые парагенезиса, пегматитовые и др.). При повышении pH значительное количество рудных элементов формируют слабо растворимые гидроксиды, а при наличии подходящих лигандов (F⁻, Cl⁻, фульвокислоты) формируют комплексные соединения, сдвигающие миграционный диапазон в щелочную среду.

В целом, основываясь на основных показателях гидрогеохимических полей (ГХП), pH и Eh рудных месторождений, Б.А. Колотов [52] предлагает подразделить их на 5 групп по геохимическим обстановкам, формирующимся в рудных водах (табл. 17).

Наиболее благоприятные условия для миграции элементов создаются в гидрогеохимических полях первой группы месторождений. Гидрогеохимическая обстановка способствует накоплению в водах рудных элементов – прежде всего катиогенногенных. Околонейтральные среды второй группы месторождений открывают тенденцию образования слабо растворимых гидроксидов и карбонатов многих элементов. Эта тенденция резко прогрессирует для двух последних групп месторождений, но сдерживается процессами комплексобразования.

4. Техногенные преобразования горнорудных территорий

В освоенных горнорудных районах главным фактором преобразования природной среды являются техногенные процессы, проявляющиеся уже на стадиях поисков и разведки месторождений и существенно интенсифицирующиеся при их эксплуатации. Разработка рудных месторождений на несколько порядков увеличивает физико-химическую денудацию, миграционную способность многих химических элементов и объем их поставок в природные воды, что в конечном счете приводит к коренному преобразованию геохимического облика водотоков. В общем случае эти изменения зависят от типа месторождения, гидрогеологических и ландшафтно-

геохимических условий водосбора, контролирующей интенсивность вторичных изменений горных пород, а также от принятой системы добычи, обогащения и передела минерального сырья. Особое значение имеют такие факторы, как количество сульфидов в разрабатываемой горной массе, состав рудовмещающих пород, степень проработки сульфидсодержащих пород процессами окисления, время существования поверхностных техногенных осадочных образований, степень очистки стоков и особенности хранения отходов, интенсивность поставки твердого материала [4, 6, 40, 411, 74, 86, 146, 152].

4.1. Преобразование наземных систем

Загрязнение ландшафтов в районах разрабатываемых рудных месторождений связано с пылением карьеров, дефляцией и размывом отвалов, с рудничными водами, рассеянием рудного материала при транспортировке, с выбросами и стоками обогатительных фабрик и горно-металлургических комбинатов, эрозией первичных и вторичных литохимических ореолов месторождений, с водными ореолами и потоками в грунтовых, подземных и поверхностных водах.

Основными причинами загрязнения атмосферы при подземной разработке месторождений являются: выдача из подземных разработок рудничного воздуха; миграция на поверхность газов, выделяющихся из массивов полезных ископаемых и пород; газовыделение и горение породной массы в отвалах; подъем пыли с отвалов и хвостохранилищ. При открытой разработке месторождений причинами загрязнения атмосферного воздуха являются: массовые взрывы при отбойке пород и полезных ископаемых; газовыделения из массивов полезных ископаемых и пород; эксплуатация транспортных и технологических машин с двигателями внутреннего сгорания; газовыделения из породных отвалов; пожары в карьерах и на отвалах; подъем пыли с отвалов и хвостохранилищ. При отсутствии в горнорудном районе предприятий по пирометаллургическому переделу руд основным объектом техногенной геохимической трансформации являются, как правило, водные системы.

При разработке месторождений в атмосферу могут поступать различные газообразные продукты (метан, оксид углерода, оксиды азота, соединения серы), которые выделяются из горных пород, полезных ископаемых или образуются в ходе технологических процессов (при взрывах, бурении, работе автотранспорта и т. п.). Осаждаясь на земную поверхность материал выбросов участвует не только в загрязнении почвенного покрова, но и в формировании состава поверхностного (талого и дождевого) стока. Очень большой объем выбросов при добыче и обогащении руд, а также при транспортировке и выгрузки руды и концентратов приходится на пыль. Объемы рассеиваемых в воздухе пылевых масс даже на горно-обогатительном комбинате средней производительности составляют многие сотни и тысячи тонн в год. Например, одновременно при массовых взрывах на крупных карьерах используется 200–1000 т взрывчатого вещества [23, 67]. Объем пылевого облака достигает 20–25 млн. м³. В воздух на высоту 150–250 м поднимается до 150–300 т пыли. По данным [139], в составе пыли, образующейся при бурении шпуров и при взрывных работах на золотых рудниках ЮАР, отмечены высокие концентрации Pb, Zn, Cu, Fe, Mn, Cr, Ti и других элементов. В районах добычи урановых руд фиксируется загрязнение воздуха и прилегающих территорий радиоактивной пылью, возникновение которой связывается с распылением руды при ее подъеме на поверхность и дефляцией

отрабатанных пород [151]. Следует отметить, что атмосфера многих рудников по добыче цветных и редких металлов отличается повышенной радиоактивностью [116]. Как правило, в процессах измельчения участвует вся масса руд (дробление при обогащении) или руды и вмещающие породы (горно-взрывные работы), поэтому в первом приближении состав образующейся пыли должен отвечать их составу. В то же время избирательное измельчение тех или иных минералов может изменять соотношение между химическими элементами и их соединениями в пыли по сравнению с исходными породами.

Большие объемы обогащенных химическими элементами пылевых выбросов обуславливают существенную нагрузку на окружающую среду и формирование техногенных геохимических аномалий в снежном покрове и почвах. Анализ имеющихся данных показывает, что в зонах воздействия источников загрязнения в депонирующих загрязнение компонентах (почвах и снеге) всегда образуются геохимические аномалии с четко выраженным градиентом концентрации от центра к периферии [86, 87]. Центральные части аномалий приурочены к источнику выбросов. В их пределах уровни содержания элементов в десятки и сотни раз превышают фоновые параметры. Размеры этих частей аномалий обычно не превышают первые квадратные километры (обычно не больше 10 км²). Пространственная структура (морфология) геохимических аномалий (зон загрязнения), формирующихся под влиянием выбросов в атмосферу, относительно проста и зависит от рельефа. Общий контур зоны воздействия определяется гидрометеорологической ситуацией и особенно направлением, скоростью и частотой ветров. Зоны наиболее интенсивного воздействия связаны преимущественно со штилевыми условиями и периодами невысоких скоростей ветра. Это и обуславливает центральное положение источника выбросов на площади выявленных геохимических аномалий. В горных условиях морфология аномалий во многом зависит от рельефа. Как правило, участки с наиболее интенсивным накоплением химических элементов локализованы преимущественно в пределах горнодолинных ландшафтов, в которых расположены источники выбросов. Обычно облако интенсивных выпадений практически полностью локализуется в долине, на склоне которой расположен карьер, и не выходит, по сути дела, за водораздел [86]. Оно, в частности, целиком накрыло поселок, расположенный в 1–2 км от карьера, где уровни выпадения пыли и рудообразующих металлов примерно в 50 раз выше фона. В продольном профиле вдоль долины зона аномальных выпадений распространялась значительно дальше, и фоновые концентрации металлов наблюдались лишь в 10 км от карьера. Поскольку мощность пылевого выброса карьера была так велика, то в распределении выпадений влияние обогатительной фабрики и отвалов, расположенных соответственно в 1,5 и 3 км от карьера, почти не сказалось. Тем не менее все эти объекты четко фиксировались по результатам геохимического опробования верхнего горизонта почв.

В исключительных случаях дальность и масштабы воздействия, фиксируемые по химическим изменениям в почвах, могут быть очень значительны. Так, исследования влияния железо-добывающих предприятий и их отходов на почвенный покров, показали, что Cu, Co, Ni, Pb, Zn, Mn и Cr, присутствующие в железных рудах, проникали в почву до глубины 120 см на территории, удаленной на 30 км от источника воздействия [153]. Площадь атмогеохимических аномалий в районе горнопромышленных комбинатов

Южного Приморья превышала 40 км² [50]. В зонах максимальных выпадений на расстоянии до 2 км от источника выбросов выпадало: Pb в 1000–5000 раз, Zn в 100–200, Cu и Ag в 50–100 раз больше фоновой нормы. Содержания тяжелых металлов в верхнем горизонте почв возросли в десятки раз выше фона. В окрестностях Салаирского горно-обогатительного комбината на площади 45 км² выявлено интенсивное загрязнение почв свинцом [55], причем в ближней зоне воздействия ГОКа формируются комплексные геохимические аномалии. Как известно, Салаирский ГОК функционирует с 1930-х гг., производя свинцовый и цинковый концентраты; попутно извлекаются золото и барит. Суммарная площадь (км²): карьеров – 0,45; отвалов – 0,8. В трех хвостохранилищах накоплено до 30 млн. т отвалов барит-сульфидных хвостов с содержанием: Zn до 1,4 %; Pb до 1 %; Ba до 27 %; Au – 2,6 г/т; Ag – 30 г/т [28]. За время функционирования ГОКа горняцкий поселок превратился в г. Салаир с необходимой инфраструктурой, включающий в свою черту рудник вместе с добычным и обогатительным хозяйством (карьеры, подземные горные выработки, золотоизвлекательную и свинцово-цинковую обогатительные фабрики, отвалы). Накопление сульфидных интенсивно окисляющихся отвалов, карьеры, залитые атмосферными осадками, и дренирующие подземные воды – все это создавало в течение многих лет прекрасные возможности для окисления сульфидов и проникновения рудных элементов в окружающую среду. Площадь интенсивного загрязнения почв большим комплексом токсичных элементов вокруг рудника превышает 14 км², что больше чем на порядок площади карьера вместе с отвалами. Площадь загрязнения токсичными элементами полностью совпадает с площадью пониженных по сравнению с нормой содержания хлорофилла в растительном покрове.

Исследования Ю.Н. Семенова [92], выполненные в районе хвостохранилища Садонского комбината, показали, что запасы Pb и Zn в верхнем 20 см слое почв на площади 0,35 км² составляет ~ 45 т и 120 т соответственно. Основными формами нахождения металлов в почвах являются подвижные карбонатные и гидроксильные соединения. По данным ЦОМГЭ ИМГРЭ (Г.А. Тимошкин и др.) вблизи старых обогатительных фабрик в почвах, в том числе в пределах прилегающих жилых поселков, формируются интенсивные и достаточно обширные техногенные аномалии широкой группы химических элементов (табл. 18).

В процессе разработки уральских Cu-Zn-колчеданных месторождений формируются своеобразные природно-техногенные ландшафты, получившие название геотехнических систем (ГТС) [42]. Примерами таких ГТС являются Учалинская (включает г. Учальи и его окрестности, зону влияния Учалинского горно-обогатительного комбината и отвалов Учалинского Cu-Zn-колчеданного месторождения) и Сибайская (г. Сибай и его окрестности, зона влияния Башкирского медно-серного комбината и отвалов Сибайского месторождения) ГТС.

Авторами [118] изучены геохимические особенности почв Учалинской ГТС на примере трех почвенных разрезов в районе обогатительной фабрики (ОФ). Разрез UC(sl) 1 заложен в 500 м на северо-запад от северной части карьера и в 1000 м на северо-восток от ОФ комбината; разрез UC(sl)2 заложен в 700 м от комбината и в 1200 м от карьера; разрез UC(sl)3 заложен на склоне юго-восточной экспозиции с углом 12° в 500 м от комбината к северо-западу и в 1300 м от карьера (рис. 1).

**Химические элементы в почвах вблизи обогатительной фабрики,
Северная Осетия, мг/кг**

Элемент	Фоновое содержание	Минимально-аномальное содержание	Площадь зоны загрязнения, км ²	Среднее содержание	K _с средний	Максимальное содержание	K _с максимальный
Pb	50	160	3,9	1100	22	10000	125
Ag	0,1	0,2	2,5	2,1	21	20	200
Zn	140	350	1,6	3350	24	10000	71
Cu	30	60	1,5	290	10	2000	67
Cd	1	3	1,0	12	12	50	50
Bi	1	3	0,9	8	8	40	50
Co	12	21	0,4	24	2	40	3
Mo	2	4	0,3	8	4	20	10
Sn	5	7	0,3	34	7	40	8
Ba	300	500	0,3	1044	3	2000	7
W	2	5	0,05	11	5	30	15
Sb	10	30	Единичные пробы			50	5
In	1	3	Единичные пробы			5	5
As	50	100	Единичные пробы			200	4

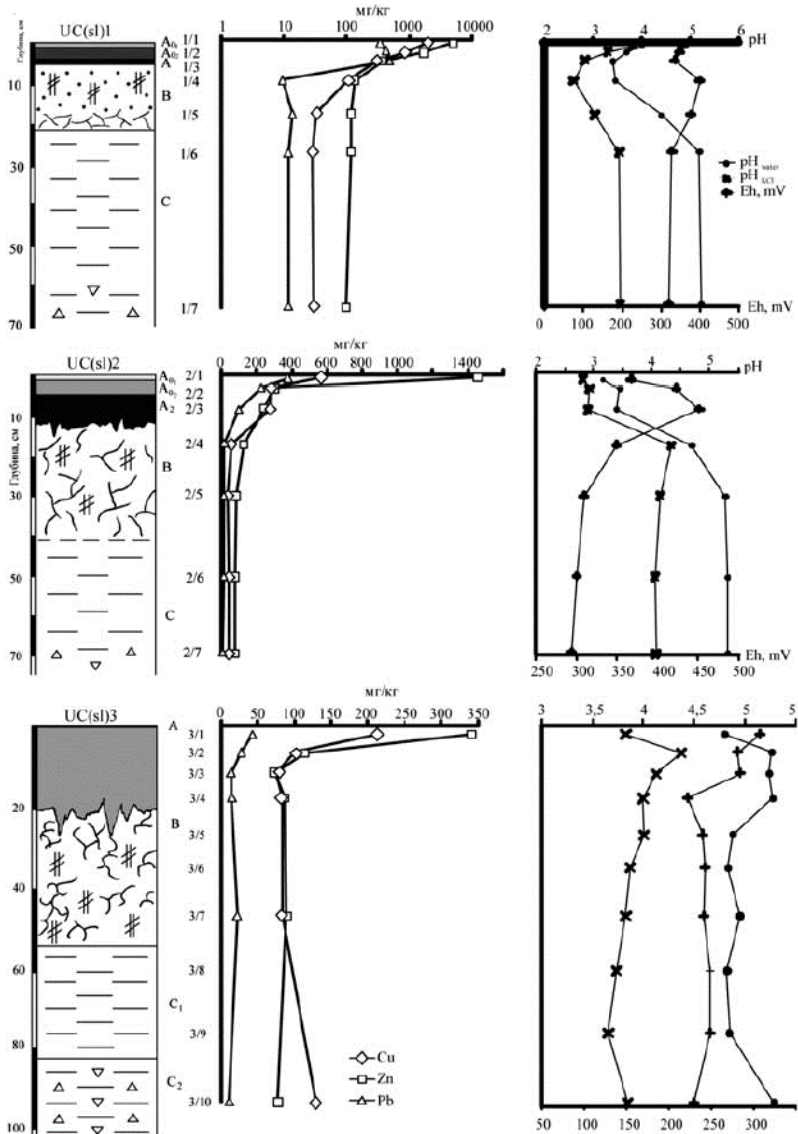


Рис. 1. Распределение Cu, Zn, Pb и значений pH и Eh в почвах Учалинской ГТС [118].

Рассеивание твердой фазы техногенных пылевых выбросов в направлении господствующих ветров приводит к трансформации геохимического облика почв и формированию «аномальных» их разновидностей, основной ареал которых ориентирован в северо-западном (разрез 3), северном (разрез 2) и северо-восточном (разрез 1) направлении от ОФ. Почвы изученных трех разрезов характеризуются кислой реакцией почвенного профиля (значения рН понижено на 2–4 единицы по сравнению с фоновыми почвами). Минимум значений рН водной вытяжки приурочен к гумусово-аккумулятивному (разрез 1) и к верхним горизонтам (разрезы 2 и 3). Процессы аномального обогащения тяжелыми металлами гумусово-аккумулятивного горизонта почв, по мнению авторов цитируемой работы, связаны с накоплением сульфидов в связи с аэральными выпадениями тонкодисперсного сульфидного материала из трубы сушильного отделения ОФ и золовым разномом сульфидно-силикатного материала от отвалов и хвостохранилища. Кислая реакция среды, низкая катионообменная емкость определяют низкую буферность этих почв и потенциально слабую комплексообразующую способность отдельных фракций почв для связывания поступающих с аэральным потоком металлов в ГТС. Поскольку техногенно-модифицированные почвы отличаются кислой средой (рН ниже 4,5), то в них, наряду с обычными обменными катионами, присутствуют обменный водород и обменный алюминий, которые формируют высокую величину обменной и гидролитической кислотности. Так, верхние горизонты почв значительно обогащены H^+ (до 50 мг-экв/100 г почвы). В иллювиальном горизонте всех почвенных разрезов также наблюдается увеличение количества обменного H^+ . Количество обменного Al^{3+} варьируется в пределах 0,022–0,89 мг-экв/100 г. Максимум характерен для гумусово-аккумулятивного горизонта (разрезы 2 и 3) и для верхов иллювиального горизонта (разрез 1). Наиболее высокие значения обменной кислотности (до 17 мг экв/100 г) приурочены к верхним горизонтам в интервале до 5 см, что, очевидно, обусловлено присутствием здесь продуктов разложения органического вещества в наибольшем количестве. Иной характер распределения указанных элементов наблюдается в фоновых почва, для которых характерны пониженное и равномерное распределение значения Eh (170–192 mV), свидетельствующие о небольшом недостатке кислорода. Также почвы характеризуются значениями рН, близкими к нейтральным для водной вытяжки и слабокислым для солевой вытяжки, низкими содержаниями обменной кислотности, обменного водорода и тяжелых металлов (Cu, Zn и Pb) и отсутствием в почве обменного Al^{3+} . Последнее является отличительным признаком отсутствия загрязнения (в данном случае подкисления). Вертикальное распределение Cu, Zn и Pb по профилю почв трех разрезов сходно между собой, но абсолютные концентрации отличаются в меньшую сторону для разреза 3. Наиболее резкие различия в содержании металлов отмечаются в верхних горизонтах почвы и обусловлены различным расстоянием от источника эмиссии. Верхние горизонты почв в зонах техногенного воздействия отличаются высокими концентрациями меди, цинка, свинца и никеля, уровни которых в десятки раз превышают фон (и ОДК).

Изучение (методом селективной экстракции) форм нахождения металлов в почвах зон загрязнения Учалинской и Сибайской ГТС показало, что максимальной долей обменных форм характеризуются Zn (до 44 %) и Cd (до 29 %) в почвах Учалинской ГТС (рис. 2). По сравнению с почвами Сибайской ГТС, где относительная доля обменных форм Cu не более 3%, в почвах Учалинской ГТС определенная часть этого металла (6%) находится в

обменной форме, но в целом доминируют прочносвязанные (кристаллические) формы (53%). Остальная часть меди в исследованных почвах связана с аморфными гидроксидами Fe (21%), карбонатами (9%) и кристаллическими оксидами Fe (8%). Для почв Сибайской ГТС заметная часть Cu (57%), Cd (38%), Pb (27%) и Zn (21%) связана с карбонатной фракцией, что является характерным признаком карбонатных черноземов данного района. Таким образом, для изученных металлов в условиях техногенного загрязнения наблюдается увеличение относительной доли потенциально подвижных форм. Весьма существенна и разница в коэффициентах мобильности меди для природных и техногенных почв, которая достигает 8 раз. В Сибайской ГТС мощность техногенного почвенного разреза Sb(sl)215, заложенного на правом берегу р. Карагайлы в 1 км от трубы ОФ, составляет 60 см (рис. 3). Значение pH в верхних, с сульфатными выцветами и гумусово-аккумулятивных горизонтах находится на уровне 3,5, что отвечает сильно закисленным почвам. Общей закономерностью распределения изученных химических элементов по почвенному профилю является их высокая концентрация в верхнем горизонте и уменьшение в нижних частях разреза, что характерно для аэралью загрязненных почв с типичным аккумулятивно-техногенным типом накопления поллютантов.

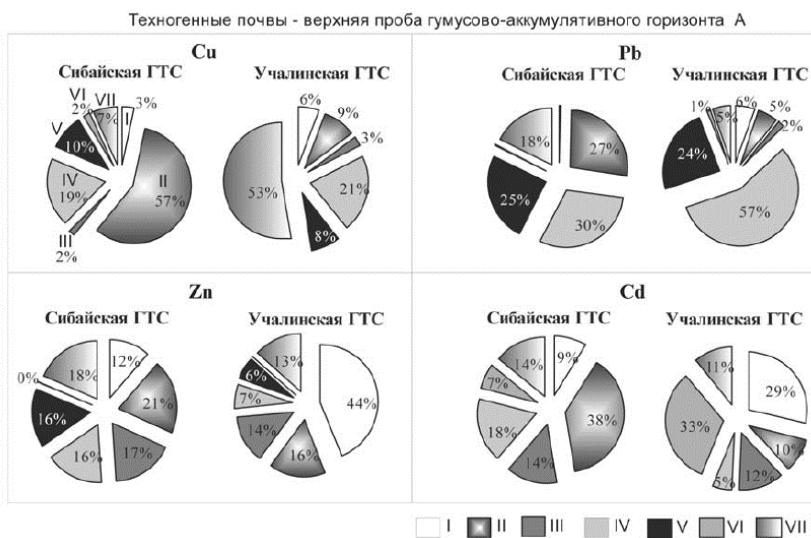


Рис. 2. Формы нахождения металлов в гумусово-аккумулятивного горизонте (А) почв Учалинской и Сибайской ГТС [118]: .

Формы: I – обменная, II – карбонатная, III – связанная с оксидами Mn, IV – связанная аморфными оксидами Fe, V – связанная с кристаллическими оксидами Fe, VI – органическая, VII – прочносвязанная

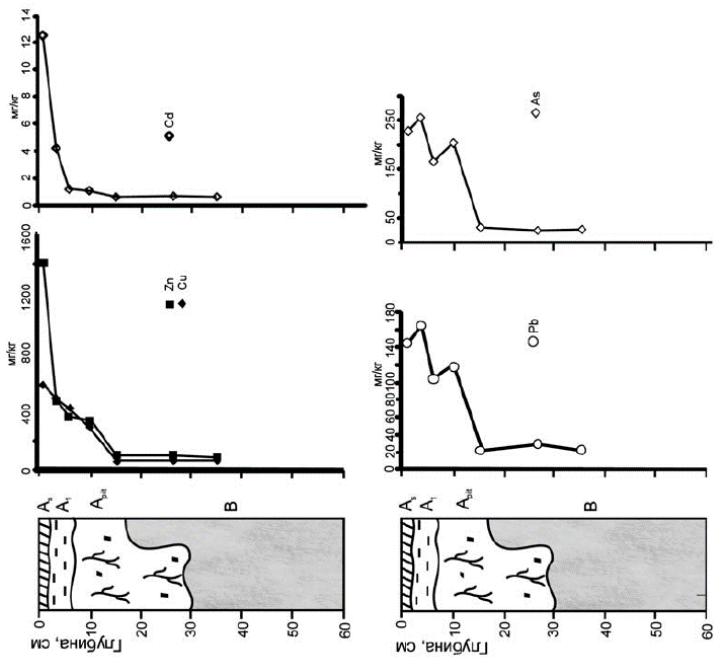


Рис. 3. Распределение Cu, Zn, Pb, Cd и As в почвенном профиле разреза Sb(s)215 Слбайской ГТС. [118]:
Горизонты: A_s – с сульфатными выцветами; A₁ – гумусово-аккумулятивный; A₂ – бурый; B – иллювиальный.

Отметим, что в пределах Южного Урала – одного из основных поставщиков медных и цинковых концентратов металлургическим заводам России расположено несколько месторождений (Юбилейное, Подольское, Сибайское, Учалинское, Новоучалинское, Гайское), которые относятся к числу крупнейших на Урале. Руды месторождений содержат также селен, теллур, кадмий, кобальт, галлий, германий, индий, бериллий и др.). Активная горнодобывающая деятельность определяет наличие здесь большого числа разнообразных источников загрязнения окружающей среды и масштабное механическое и геохимическое преобразование природных ландшафтов, подземных вод и поверхностных водных систем (рис. 4).

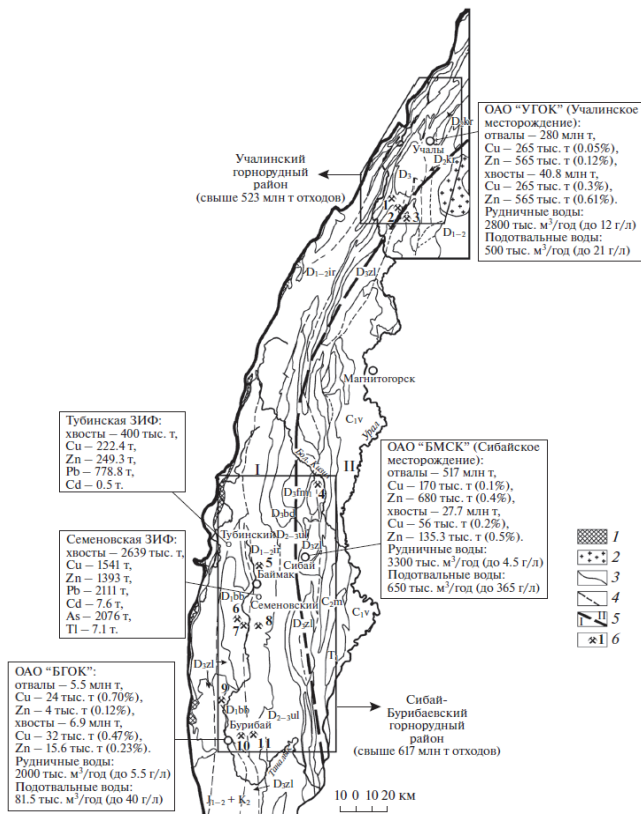


Рис. 4. Горнопромышленные предприятия Южного Урала, геохимический спектр и объемы отходов [1]:
1 – серпентиниты; 2 – гранитные массивы; 3 – стратиграфические границы;
4 – разрывные нарушения; 5 – граница между западной и центральной частями Магнитогорской мегазоны; 6 – основные месторождения: 1 – Западно-Озерное, 2 – Узельгинское, 3 – Молодежное, 4 – Бакр-Узякское, 5 – Куль-Юрт-Тау, 6 – Бакр-Тауское, 7 – Таш-Тауское, 8 – Балта-Тауское, 9 – Юбилейное, 10 – Октябрьское, 11 – Маканское.

4.2. Преобразование водных систем

С эколого-геохимической точки зрения наиболее опасными являются промышленно-генетические типы месторождений, разработка которых приводит к резкому увеличению мощности зоны гипергенеза и изменению условий миграции поллютантов. Наиболее существенные изменения важнейших условий миграции химических элементов (окислительно-восстановительного потенциала, кислотно-щелочного равновесия, доминирующих видов лигандов, способствующих водной миграции элемента) должны происходить при разработке сульфидных месторождений, характеризующихся наличием в рудах большого количества двойных сульфидов (pH 2–4, Eh до 700 мВ), – колчеданных, магматических ливкационных, стратиформных медно-полиметаллических и др. [53, 55]. В водах этих месторождений будут концентрироваться значительные количества тяжелых металлов переходных периодов с низкой валентностью (Pb, Zn, Cu, Co, Ag, Ni и др.). Отличная от этой группы по рассматриваемым показателям – группа месторождений, связанных со щелочными породами (позднемагматические, карбонатитовые), в водах которых (pH 8,5–12, Eh 200 мВ) накапливается значительное количество лигандо-комплексобразователей, способствующих миграции химических элементов. В щелочных водах наиболее активно мигрируют токсичные элементы с высокой валентностью (TR, Cr и др.) и антропогенные элементы (F, As). При прочих равных условиях наиболее опасным (с экологических позиций) представляется разработка месторождений в северных тундрово-лесных районах, где развиты процессы выщелачивания (Кольский п-ов, район Норильска, Чукотка).

Обычно на ранних стадиях освоения месторождения состав химического загрязнения соответствует геохимической специализации территории, а степень техногенного воздействия относительно невелика. Так, например, массивные и брекчиевые руды Шанучского кобальт-медно-никелевого месторождения (Шанучское рудное поле площадью 85 км², Быстринский район Камчатского края) содержат (в %): Ni до 9,76 (среднее 4,62), Co до 1,50 (0,24), Cu до 4,82 (0,81); а также (в г/т): Au до 1,05 (среднее 0,3), Pt до 2,94 (0,5), Pd до 1,79 (0,57). Во вкрапленных и прожилково-вкрапленных рудах средние содержания составляют (в %): Ni – 1,79, Co – 0,06, Cu – 0,45; а также (в г/т): Au – 0,2, Pt – 0,5, Pd – 0,26. Следует отметить, что это месторождение является уникальным по содержанию никеля в руде (в отдельных пробах до 16%). На многих других никелевых месторождениях России – в среднем около 1%. Разработка месторождения осуществляется с 2005 г. Результаты мониторинговых наблюдений за составом поверхностных вод свидетельствуют о том, что в зоне влияния рудника Шануч в водах ручьев отмечаются высокие концентрации аммонийного азота (до 4,8 ПДК), что является следствием буровзрывных работ, проводимых при проходке штолен [38]. В водах водопритоков некоторых штолен отмечены высокие концентрации нефтепродуктов. В донных отложениях водотоков фиксируются аномалии Cr, Cu, Ni и Co незначительной интенсивности. Таким образом, относительно незначительный период разработки и, судя по всему, соблюдение экологических требований обуславливают незначительную геохимическую трансформацию ландшафтов и их основных компонентов.

Тем не менее, как правило, по мере увеличения степени освоения месторождений интенсивность техногенного воздействия увеличивается, а качественный состав загрязнения может заметно меняться.

В районах, связанных с добычей, обогащением и переработкой различных руд, резко меняются характер и интенсивность поступления химических элементов не только в наземные экосистемы, но и особенно в водные системы. Это связано с изменением масштабов и интенсивности механической и водной миграции, что обусловлено перемещением больших масс горных пород и их последующим перераспределением в отвалах под действием гравитационных процессов, разрушением хвостохранилищ под влиянием экзогенных факторов, поступлением сточных вод с рудников, обогатительных фабрик, шламохранилищ и металлургических предприятий, а также поверхностного стока с территорий, загрязненных промышленными выбросами и отходами. В горнорудных районах образуются три основные группы отходов, являющихся источниками поступления поллютантов в окружающую среду: твердые отходы (отвалы пустых пород, хвосты обогащения, шламы металлургических предприятий и т. п.), сливы и сточные воды, пылегазовыбросы в атмосферу. В свою очередь, можно выделить три основных способа поставки загрязняющих веществ в поверхностные водотоки: со сточными водами, возникновение которых связано с техногенной деятельностью, с водами поверхностного (склонового) стока, формирующихся при таянии снежного покрова и во время дождей, в результате эолово-дефляционных процессов.

Горное производство отличается значительными объемами потребляемой воды. Например, в 2015 г. в Свердловской области на долю горнодобывающей промышленности приходилось 36% (или 273,97 м³) свежей воды от общего ее использования [33]. Аналогичная ситуация характерна для многих горнорудных регионов нашей страны. Усредненные нормы расхода воды при добыче 1 т полиметаллических руд открытым способом составляют 0,15 м³, подземным – 3,05; обогащение 1 т полиметаллической руды – 1,23, медных – 1,02–4,46 м³. Нормативы водопотребления на металлургических заводах еще более высоки (в 2–15 раз) [107]. Объемы отводных сточных вод в горнопромышленных районах также чрезвычайно велики. Так, на медно-цинково-пиритном руднике Финаслами (Финляндия) общий водосток достигал около 5 млн. м³ воды, состоящей из вод отходов обогащения, дождевой воды и воды, откачиваемой из рудника [23]. Использование воды на руднике составляло (при годовой добыче руды примерно 1 млн. т) 2,5–3,5 м³ на 1 т руды. Общее потребление воды на обогатительной фабрике на цинковом руднике Виханти (Финляндия) достигало 2,7 м³ на 1 т руды или 2,85 млн. м³ в год. В 1983 г. примерно 22% от этого количества было выкачено из рудника, 34% из отстойника. Свежая пресная вода составляла до 44% общего водопотребления. Степень рециркуляции воды колебалась от 60 до 70%. Объем карьерных и шахтных вод Учалинского ГОКа составляет 2200–2800 тыс. м³/год [57].

Сточные воды, образующиеся в горнорудных районах, обычно включают водоотлив из подземных горных выработок и карьеров, стоки обогатительных фабрик, с отвало- и шламохранилищ, с площадок кучного выщелачивания, а также сточные воды расположенных непосредственно в горнорудных районах металлургических предприятий (табл. 19). Кроме того, как отмечалось выше, поставка различных веществ в поверхностные водотоки осуществляется также с рудными и ореольными водами, образующими природные вторичные ореолы и потоки рассеяния. Состав поверхностного стока формируется в результате загрязнения подстилающей поверхности (горных пород, почв, снегового покрова) пылегазовыбросами при открытых горных разработках, вентиляционными выбросами рудников, при дефляции

оттохранилищ и площадок кучного выщелачивания, при потерях рудного вещества при транспортировке руд и пород, выбросами (организованными и неорганизованными) в атмосферу при процессах обогащения и переработки сырья и использования сопутствующих материалов на обогатительных фабриках и металлургических предприятиях. Определенную роль играет поверхностный сток с территорий, в пределах которых развиты рудогенные геохимические аномалии.

Автором [115] изучен состав вод, формирующихся в зоне гипергенеза четырёх вольфрамовых месторождений, расположенных в Юго-Восточном Забайкалье (жильные кварц-вольфрамит-сульфидные Белухинское, Букукинское и кварц-касситерит-вольфрамитовое Антоновгорское месторождения Кукульбейского рудного узла и грейзеновое кварц-сидерофилитное вольфрамовое Спокойнинское месторождение Агинского рудного узла). Главным рудным минералом изученных месторождений является вольфрамит. Для руд Белухи, Букуки и Антоновой Горы характерно повышенное содержание сульфидов, а для первых двух также флюорита. На месторождениях в течение продолжительного времени велась добыча вольфрамового сырья. Извлечение рудных компонентов производилось на местных фабриках. Отвалы и хвостохранилища не рекультивировались. Вскоре после ликвидации рудников хвостохранилища были размыты, пески вынесены в речную сеть на удаление до 3–5 и более километров. Нарушение геологического пространства привело к изменению условий водообмена и дренирования подземных вод, следствием чего явилось усиление химического выноса основных ионов, а для сульфидсодержащих месторождений, помимо прочего, формирование кислого дренажного стока и рост концентраций (при резко выраженной их неоднородности распределения) практически всех химических элементов, включая тяжелые металлы, кремний, алюминий, фтор, калий, натрий и другие (табл. 20). Максимальные концентрации многих химических элементов в водах месторождений многократно превышают их средние содержания в реках мира. Более того, для ряда элементов даже минимальные уровни нередко выше средних концентраций в реках мира.

Показательно, что в процессе гидрогеохимического опробования площадей месторождений автором цитируемой работы визуально фиксировались разнообразные белёсые и бурые налёты, корочки и прочие образования. Химический анализ этих отложений показал присутствие в их составе (помимо породообразующих компонентов) Fe, Mn, W, Mo, As, Cu, Zn, Pb, Sb и других элементов.

Шахтаминское месторождение расположено в пределах горно-таежной ландшафтно-климатической зоны юго-восточного Забайкалья в пределах олововольфрам-редкометального минерагенического пояса и относящегося к молибденит-галенит-сфалеритовой рудной формации. Для данного региона характерны среднегорный рельеф с относительноными превышениями над долинами 200–350 м; развитие многолетней мерзлоты островного характера, а также малые осадки зимой и сравнительно большие летом (до 480 мм). В естественных условиях в пределах Шахтаминского рудного поля формируются преимущественно околонейтральные, ультрапресные и пресные гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые воды [114]. На общем гидрогеохимическом фоне выделяются техногенно измененные воды: слабощелочные пресные и с относительно повышенной минерализацией (0,43–0,93 г/л) гидрокарбонатно-сульфатные магниевые-кальциевые и магниевые-кальциевые-натриевые шахтные воды, а также щелочные с относительно повышенной минерализацией и солончатые (0,70–1,45 г/л) хлоридно-гидрокарбонатные и сульфатные натриевые воды шламохранилища.

Серьезными источниками поставки загрязняющих веществ водные системы являются отходы добычи, обогащения и металлургической переработки руд. Так, сравнение состава руд, отходов их добычи, обогащения и металлургической переработки показывает, что существенная часть элементов, присутствующая в рудах, интенсивно концентрируется в указанных отходах (табл. 21). При этом очень часто в последних более высокие уровни характерны не для основных рудных элементов, а для отсутствующих элементов (элементов-индикаторов). Кроме того, в отходах типично появление элементов, отличающихся более высокими уровнями содержания, нежели в рудах (т. е. в ходе технологических процессов происходит вторичное обогащение).

Вблизи соответствующих предприятий в отходах обогащения ежегодно складываются десятки, сотни и даже тысячи тонн химических элементов (табл. 22). Например, в отвальных шлаках ГМК «Североникель» в среднем содержится 1100 мг/кг Cu, 1100 мг/кг Ni, 400 мг/кг Co; в отвалах комбината «Печенганикель» концентрации Ni составляют 800–1000 мг/кг, Cu – 600–1000 мг/кг [110]. В последнем случае масса отвалов достигает 20 млн. т, т. е. в них аккумулировано по 20 тыс. т Ni и Cu. При выветривании отходов идет активное извлечение из них сульфатов меди и никеля. В районе Салаирского горно-обогатительного комбината в хвостохранилищах накоплено около 30 млн. т отходов, в которых содержания Au, Ag, Pb, Zn и Ba могут превышать таковые в балансовых рудах [15]. Так, концентрации Ba достигают 27%, Zn – до 1,4%, Pb – до 1%, Ag – 30 мг/кг [55].

Для полиметаллических месторождений имеется значительное количество данных, показывающих, что концентрации химических элементов в породных отходах могут быть чрезвычайно высокими. Особенно это касается отвалов разработок прошлых лет, когда выбирались руды со значительно более высокими концентрациями, нежели в настоящее время. Например, по данным [140], в отвалах ряда полиметаллических месторождений США, Англии и некоторых африканских стран содержания Pb достигают сотен и тысяч мг/кг (до 1,5% в Уэльсе), Zn – тысячи мг/кг (иногда до 3%), Cu – сотен и тысяч мг/кг. Отходы, образующиеся при разработках месторождений борато-магнетитовых руд, обогащены As (в среднем 100 мг/кг; годовое поступление составляет 200 т), Cr (в среднем 342 мг/кг; поступление – 684 т), редкими землями (1300 мг/кг; поступление – 2600 т) [86]. Высокими концентрациями ряда химических элементов отличаются шлаки горно-металлургических предприятий.

В рудах и рудовмещающих породах химические элементы, присутствующие в сульфидных формах, на дневной поверхности начинают испытывать активное воздействие разнообразных агентов выветривания [83, 85, 87]. При этом миграционная подвижность продуктов выветривания обусловлена, прежде всего, количеством сульфидов и, следовательно, образующейся при их окислении серной кислоты, а также сорбционными, нейтрализующими и осаждающими свойствами вмещающих оруденение горных пород. Показательно, что во многих случаях содержания сульфидов в отходах (особенно в хвостах обогащения) превышают 10–20% при уровнях металлов (таких, как Pb, Zn, Cu) в десятки, сотни и даже тысячи раз выше их кларков. Практически всегда техногенное воздействие на месторождения приводит к резкому (в несколько раз) увеличению мощности зоны гипергенеза. Такие явления, например, наблюдались на Красногвардейском медно-колчеданном месторождении на Урале [2] и на сульфидно-касситеритовых месторождениях Комсомольского оловорудного района [78].

Химические элементы в различных водах горнорудных территорий Приморья [6]

Место, месторождения	pH	SO ₄ ²⁻	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Фон, Сихотэ-Алинь	7,35	6,8	<10	2,5	10,5	1,7	9,1	<2	0,05	0,7
Рудничный водоотлив, касситерит-силикатное	7,40	402	22	2299	12	26	644	5	8,2	2,8
То же, касситерит-сульфидное	3,15	499	3170	13910	131850	5210	25440	200	502	191
Дренажный сток, обогащение скарново-полиметаллических руд	5,16	202	11	152	16	2	68	5	0,2	1,3
То же, шламоохранилище, обогащение Pb-Zn руд, силикатные породы	3,48	276	4300	20890	101940	140	24470	18	56	318
Воды штольни, горизонт 1060 м, касситерит-сульфидное	4,78	479	2260	24000	73	1180	36490	<2	558	40
То же, горизонт 795 м	7,18	190	32	4010	44	58	4460	2	36	1,8
Вода, карьер, полиметаллическое	6,85	885	14	12040	69	51	28740	<2	76	4,4
Дренажный сток из-под отвалов	3,30	4050	2140	40810	13210	8630	350520	4	1470	265
То же, шламоохранилище, обогащение Pb-Zn руд	7,24	359	<10	1642	53	1,4	120	2	0,56	50
Рудничный водоотлив, касситерит-силикатное малосульфидное	6,95	105	95	3870	9	66	1500	8	12	10
То же, после отстаивания	6,24	160	266	2150	15	257	1650	<2	12	2
Ручей, рудничный водоотлив, касситерит-сульфидное	3,22	506	7940	13750	81920	4676	22800	44	362	105

Примечание. Сульфаты в мг/л, металлы и мышьяк в мкг/л.

Химический состав вод вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья [115]

Показатель	Месторождения				Среднее в реках мира
	Белухинское	Букиинское	Антонюгорское	Слокойинское	
pH	3,68-8,1	2,1-7,2	2,7-6,8	6,0-8,8	-
Еh, мВ	278-472	211-558	373-571	13-197	-
SO ₄ ²⁻	1,9-271	0,5-640	0,8-613,1	7,8-352,0	8,25
HCO ₃ ⁻	0,9-83,4	0,4-102	0,6-10,4	21,3-348,9	52
Cl ⁻	0,2-21,9	0,2-25,1	0,3-5,6	0,2-95,4	5,75
F ⁻	0,83-38,7	0,03-131,5	0,62-23,9	0,8-3,3	0,1
Ca ²⁺	1,1-101	0,4-241,8	2,9-177,9	0,1-164,5	13,4
Mg ²⁺	0,1-13,4	0,4-45,7	0,1-46,8	0,3-43,6	3,35
Na ⁺	1,2-15,5	0,2-20,4	0,5-13	0,6-77,4	5,15
K ⁺	0,1-6,2	0,1-13,4	0,5-2,8	0,02-14,1	1,3
Si	5,26-9,69	0,5-23	5,5-20,5	0,5-7,2	-
Сумма ионов	11-393	11-954	7,9-846	51,1-698,6	89,2
Al	63-700	0,2-107000	20-20500	100-300	50
Fe	13-4800	20-75900	50-32700	20-9460	40
Mn	10-1400	20-10800	100-2790	32-2030	10
Zn	5,2-4600	2-86200	148-10700	0,5-45,8	20
Cu	0,2-1500	0,5-16900	50,4-3810	0,7-4,1	7
Pb	0,2-7,6	0,1-3150	0,14-90	0,1-6,4	1
Cd	0,1-7,87	0,1-1100	6,3-182	8-12	0,2
Ni	0,2-28,6	0,2-540	2,1-90,8	0,8-51	2,5
Co	0,2-7,52	0,2-220	0,2-72	0,5-26	0,3
W	0,1-21,4	0,1-19	0,1-12	0,1-300	0,03
Mo	0,1-97,3	0,1-240	0,1-40,7	0,1-53,7	1
Sn	0,1-1,0	0,1-6,0	0,18-2,7	0,1-2,45	-

Химические элементы в рудах, отходах обогащения и шлаках [56, 132, 137, 138]

Месторождение	Объект	Порядок значений классов концентрации элементов				
		>>100	100–30	30–10	10–3	3–1,5
Колчеданно-полиметаллическое	Руда	Bi-Te-Zn-Cd-Pb-As-S-Ag	Se	–	–	–
	Отходы обогащения	Bi-Te-Cd-Ag-As	Pb-Zn	Se-Mn	S	–
Полиметаллическое	Руда	Cd-Zn-Ag-Pb	Cu-Bi	Mo	Sn-Co	Y-Ga-Sr
	Отходы обогащения	Ag-As	Pb-Cd-Sb	Cu-Bi-Zn-	Sn	Ba-Co-Nb
	Шлам металлургического завода	Ag-Cd-Zn-Pb	Cu-Mo	Co-Sn-Ni	Mn-Bi	W
Колчеданно-полиметаллическое	Шлам из хвостохранилища	Bi-Pb-Zn-As-Ag-Cd-Sb-Cu	–	Ba-Tl-Mo	Mn-Co	W-Ge

Химические элементы в рудах и отходах колчеданно-полиметаллического месторождения [86]

Элемент	Рудная масса		К _с	мг/кг	Отходы	P
	мг/кг	К _с				
Висмут	40	4400	30	3000	37	37
Теллур	1	1000	1	1000	1,2	1,2
Цинк	66700	804	3000	36	3700	3700
Кадмий	100	770	30	230	37	37
Свинец	11900	740	1500	94	1850	1850
Мышьяк	1000	590	200	120	246	246
Сера	192000	400	1390	3	1712	1712
Серебро	16	230	10	137	12	12
Селен	2	40	1	20	1,2	1,2
Марганец	–	–	10000	10	12360	12360

Примечание. К_с – коэффициент обогащения относительно фона; P – запасы химических элементов в отходах, т/год.

Наиболее сильно интенсивность процессов выветривания возрастает в условиях отвалов и хвостохранилищ, что обусловлено здесь высокой проницаемостью агентов выветривания и хорошими условиями для удаления растворимых продуктов, не успевающих осадиться на геохимических барьерах. Кроме того, выщелачивание химических элементов в хвостохранилищах интенсифицируется кислотными остатками флотореагентов, поступающими вместе со сбросными водами. Как правило, материал хвостохранилищ представлен мелкими и тонкими гранулометрическими фракциями, что предопределяет его повышенную миграционную способность. Принципиален тот факт, что в отвалах и хвостохранилищах активно идут процессы современного минералообразования, направленные на образование вторичных минералов, обычно менее устойчивых в условиях окружающей среды. В отвалах, в ходе процессов новейшего выветривания, так же как и в коренных породах, образуется профиль с вертикальной зональностью окислительно-восстановительного типа [84]. Девис [140] приводит данные о формировании поверхностной зоны окисления в погребенной зоне восстановления. При разработке колчеданных месторождений, когда сульфидные руды вступают в непосредственное соприкосновение с большими количествами свободного кислорода, процессы окисления могут протекать настолько интенсивно, что температуры поднимаются до 300°C и даже выше и происходит обильное выделение удушливых газов. Эти бурные процессы подземного окисления пирита в рудниках получили название «подземных колчеданных пожаров» [89]. Рудничные воды в этой зоне имеют температуру до 100°C. Окисление пирита и других сульфидов при колчеданных пожарах приводит к образованию серной кислоты, сульфатов, различных летучих продуктов. Все это способствует интенсификации эпигенетических процессов. На Красногвардейском месторождении наблюдалась герметично закрытая горная выработка, стенки которой были покрыты новообразованными хорошо растворимыми минералами: мелантеритом, пизанитом, глоккеритом, самородной серой и др. Расчеты показали, что в результате химического разубоживания за год выносится 170 т серы халькопирита и более 500 т серы пирита; за период эксплуатации одного из медно-колчеданных месторождений с 1935 г. по 1983 г. рудничными водами вынесено более 50 тыс. т Cu , причем до 40% этого количества поступило в окружающую среду [2]. В отвалах, образующихся при разработке оловянно-полиметаллических месторождений, в верхнем слое формируется зона выщелачивания (мощностью до 30–40 м), обедненная рудными элементами и железом [76]. Верхние горизонты отвальных пород характеризуются низкими значениями pH водной вытяжки (3,5–4,5). В нижних горизонтах отмечается обогащение гидроксидами Fe и Mn, иногда формируется зона скопления гипса. В почвах, погребенных под отвалами, происходит подкисление всей толщи профиля (pH 3,5–4,0), разрушаются почвенные коллоиды, нарушается почвенный поглощающий комплекс, активизируется миграция органического вещества. Все это свидетельствует о подвижности химических элементов в отвалах, которые практически никогда не изолированы от водных систем. В сернокислых ландшафтах в ходе миграции химических элементов от отвалов к местному бассейну стока осуществляется определенная геохимическая дифференциация (табл. 23). В результате создается определенная зональность, что выражается в существовании: 1) области преимущественного осаждения Fe и связанных с ним аниогенных элементов (P, As), а также Pb на щелочно-кислородно-сорбционном барьере у выходов фильтрационных вод на поверхность; 2) области аккумуляции Zn, Cu, Cd, Pb на органи-

сорбционных барьерах торфяно-перегнойно-глеевых пойменных почв [40]. Тем не менее в речных водах ниже отвалов (ниже впадения фильтрационных вод) фиксировались повышенные (на 1–4 порядка) концентрации Zn, Cd, Cu, Fe, As, P, Mg, сульфатов и др. Самые протяженные потоки (до $n \times 10$ км) образуют Zn и Cd.

Джусинское колчеданно-полиметаллическое месторождение (Оренбургская область) отрабатывается открытым способом с 2003 г. Согласно [31], извлечение руд на поверхность привело к существенному изменению химического состава подземных вод, что проявилось в формировании в окрестностях месторождения их интенсивного загрязнения свинцом (до 0,13 мг/л), железом (12,3 мг/л), марганцем (4,2 мг/л), соединениями азота и особенно нитратами (в несколько раз выше ПДК), сульфатами, хлоридами (до 4778 мг/л).

Воды, образующиеся на отвало- и хвостохранилищах, сбрасываются в поверхностные водотоки или инфильтруются в ложе и борта мест захоронения, в конечном счете также разгружаясь в водные объекты. Важная роль в поставке поллютантов принадлежит рудничным водам. Так, если в горных районах Сев. Осетии естественным фоном являются маломинерализованные в основном гидрокарбонатные кальциевые воды, то сливные воды полиметаллических рудников отличаются высокой минерализацией и сульфатно-кальциевым (натриевым) составом (табл. 24).

Сток водоотлива рудников и карьеров характеризуются специфическим общим составом и обогащены многими элементами, концентрации которых многократно превышают фоновые и кларковые уровни (табл. 25, 26).

В районе Учалинского месторождения основной природный фон создается пресными гидрокарбонатными кальциевыми (реже натриевыми) водами с минерализацией 650 мг/л (рН 6,4–7,2) [57]. Вблизи рудных тел под влиянием окисляющихся сульфидов формируются сульфатные воды с минерализацией 1000–3000 мг/л (рН 4–6,5), в которых в очень высоких уровнях содержатся железо (до 220 мг/л), медь (0,01–7,6), Zn (0,4–110), Pb (0,012–0,074), Mo (до 0,002), Mn (до 0,5 мг/л) и др. В кислых рудничных водах (рН 3–6) концентрации железа и других металлов достигают столь больших величин, что они определяют химический тип воды. В зоне влияния Сибайского месторождения на подземные воды в результате смешения с рудными водами состав воды становится гидрокарбонатно-сульфатным и возрастают содержания железа (до 45 мг/л), меди (0,002–0,6) цинка (0,03–2,0 мг/л). В зонах, примыкающих к рудным телам, формируются сульфатные воды с минерализацией 0,66–1,5 г/л и содержанием железа 1,5–160 мг/л, меди 0,007–1,75, цинка 0,04–62,5, молибдена до 0,003 мг/л. Карьерные воды Сибайского месторождения (9120 м³/сутки) характеризуются следующими параметрами: рН 5,9, сухой остаток до 3216 мг/л, Cu 0,067, Zn 8,68, Cd 0,007, Fe 3,6, Mn 5,94, Cr 0,07, Sr 2,6 мг/л. Шахтные воды здесь имеют следующие показатели: рН 7,21, Fe 0,12 мг/л, Cu 13,36, Pb 1,12, Cr 0,6, Hg 0,02.

В шахтных водах Октябрьского и Сибайского медно-колчеданных месторождений концентрации ртути достигали 13 и 20 мкг/л соответственно [68]. В шахтных и рудничных водах медно-колчеданных месторождений Урала содержится ряд микроэлементов (TR, Cd, Sb, W и др.), концентрации которых приближаются к содержаниям в соответствующем сырье [96–99]. Так, среднегодовые концентрации редкоземельных металлов, несмотря на вариации от года к году, постоянно превышают рекомендуемые условные минимально промышленные содержания. Свообразным химическим составом и высокими концентрациями многих металлов характеризуются сточные воды золотых рудников (табл. 27).

Таблица 23

Вынос химических элементов из отвалов отработанного полиметаллического месторождения, юг Дальнего Востока

Место	pH	SO ₄ ²⁻	P	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Отвалы, мг/кг	—	—	12000	180000	1300	29000	4000	140	12000
Фильтрационные воды, мг/л	2,6–3,9	5000	0,2	100	6	800	—	2	0,6
Латеритоподобный панцирь, подножные отвалы, мг/кг	—	—	20000	720000	Слабое накопление		3600	Слабое накопление	
Пойма малой реки, торфяно-перегнойная почва, мг/кг	—	—	—	—	12000	140000	—	18000	
Речные воды	Концентрации повышены на 1–4 порядка								

Примечание. Таблица составлена по данным [40]; приведены максимальные значения; отвалы образованы бескарбонатными вскрышными породами и забалансовыми рудами.

Таблица 24

Химический состав шахтных вод рудников Северной Осетии, мг/л [80]

Рудник	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Сухой остаток
Буронский	166,6	530,2	10,3	13,6	230,0	24,4	937,0
Холст	136,4	682,5	3,1	23,4	231,6	49,0	1131,0
Садонский	318,7	584,9	13,7	195,6	154,5	30,3	1105,0
р. Цейдон (фон)	61,0	27,6	2,1	12,9	16,9	2,9	121,0

Таблица 25

Состав вод вблизи Юрьевского золотосеребряного месторождения, мг/л [117]

Объект	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	M
Штольня	266,0	332,0	1,0	3,7	1,9	156,3	45,6	0,8	807,3
Фон	22,0	1,7	1,0	2,6	0,4	5,4	1,1	0,1	34,7

**Химические вещества в водах сульфидных шахт Финляндии
(Нуурра, 1981, 1983; цит. по [23])**

Шахта	Глубина, м	pH	мг/л			мкг/л				
			SO ₄ ²⁻	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb		
Отоку	10	6,9	110	0,8	400	3	170	1		
	320	4,1	4400	220	2300	20	3100	1		
Пухасалми	150	3,1	3200	90	600	100	230000	60		
	210	3,0	5000	260	500	100000	1100000	35		
	500	7,2	630	0,2	1	2500	2400	16		

Химический состав сточных вод золотых рудников ЮАР [145]

Месторождение	pH	SO ₄ ²⁻	Mn	Fe	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Уэст Витс	1,7	11130	206	550	4000	3300	6400	5400	26000	52	290
Уэст Ранд	3,7	2950	18	3	20	2250	1540	1220	4680	7,0	81
Центральный Ранд	3,0	4500	41	124	72	2610	15900	540	13200	6,1	32
Ист Ранд	4,0	340	4	-	-	270	1920	60	1150	0,2	-
Эвандер	3,2	2960	10	29	61	1500	3800	400	3000	2,5	2
Фон в реках	-	11	0,007	0,1	1	0,2	1	3	10	0,5	0,5

Примечание. Сульфаты – мг/л, металлы – мкг/л.

Очень высокие концентрации многих химических элементов отмечают-ся в так называемых подотвальных и приотвальных водах колчеданных месторождений Урала [42]. Нередко их уровни вполне сопоставимы с содержаниями в рудах (рис. 5). Минерализация подотвальных вод серноколчеданного месторождения Куль-Юрт-Тау достигает 13,5–107 г/л при pH от 1,65 до 2,75, воды содержат Fe до 10000 мг/л, Cu до 26,81, Zn 12,51, Co 12,04, Ni 1,31, Hg до 0,00021 и др. [57].

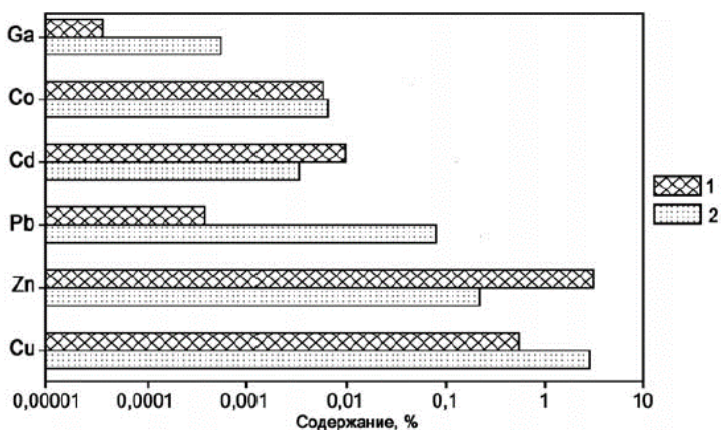


Рис. 5. Сопоставление содержания металлов в подотвальных водах (1) и рудах (2) Сибайского медно-колчеданного месторождения [57].

Волковское месторождение – наиболее типичное медное магматическое месторождение на Урале – приурочено к одноименному габбровому массиву, расположенному в западной части Тагильского синклиория [3]. Медные руды образуют зону протяженностью свыше 3 км, которая состоит из многочисленных параллельно расположенных линзовидных залежей. На месторождении насчитывается свыше 200 рудных тел, большая часть из которых сложена медносulfидными, титаномagnetитовыми и апатитовыми рудами. Выделяются два типа руд – преобладающие ванадиево-железо-медные и ванадийсодержащие железные. Главным промышленным компонентом является медь, существенное значение имеют также железо, ванадий, титан, фосфор. Отмечены примеси золота, серебра, палладия, селена, телура. На месторождении развита зона окисления, частично отработанная еще в прошлом столетии. Месторождение эксплуатируется открытым способом с 1967 г. Окисленные руды здесь не использовались, а складировались в отвалы, масса их достигает почти 2,5 млн. т; подотвальные воды характеризуются очень специфическим составом (табл. 28). Как видим, воды в основном кислые и (при значительном размахе значений) отличаются очень высокой минерализацией, экстремально высокими концентрациями сульфатов, меди, никеля и высокими концентрациями железа. Сейчас ставится вопрос о переработке отвалов методом кучного выщелачивания.

**Химический состав подотвальных вод на Лаврово-Николаевском участке
(отработка завершена в 2010 г.) Волковского месторождения [93]**

Показатель	Отвал окисленных руд			Отвал смешанных руд	
	1985 г.	1987 г.	1988 г.	1985 г.	1987 г.
Сухой остаток, г/л	1–42,1	1,9–16,8	2,8–7,0	0,9–16,2	0,3–5,5
Сульфаты, г/л	–	0,005–10	1,87–5,1	–	0,1–3,9
Медь, мг/л	9,2–1400	0,07–1216	482	0,4–780	0,02–345
Цинк, мг/л	0–118	0,07–33	11,5	0,16–46,7	0,03–107
Железо общее, мг/л	0,45–60	0–125	20,9	0,66–720	0–160
pH	2,5–6,0	3,2–6,4	3,7–3,9	2–7	2,5–7,1

С эколого-геохимических позиций особенно негативные последствия вызывает поступление (отвод, сброс) кислых рудничных вод. Хорошо известно, что даже в результате естественного выщелачивания сульфидных руд значения pH указанных вод могут снижаться до 3–4, что интенсифицирует процессы растворения и выщелачивания химических элементов, резко увеличивает их миграционную способность и, соответственно, содержания в поверхностных водах. Например, на гидротермальных плутогенных месторождениях сульфидного подкласса в связи с интенсивными процессами окисления сульфидов воды характеризуются значениям pH 3–3,5 и повышенными значениями Eh (до 600 мВ) [52]. Гидрогеохимические поля таких месторождения выделяются высокими уровнями содержаний многих халькофильных элементов. Активная добыча руд еще более увеличивает интенсивность выщелачивания и способствует снижению pH природных вод до 1,4–3. Поступление кислых рудничных стоков в поверхностные водотоки вызывает преобразование речных экосистем на значительных расстояниях. Практически в любом климате в районах добычи и переработки сульфидных руд формируются сернокислые ландшафты [73, 74].

Одним из наиболее известных бассейнов дренирования кислых вод является район Спринг-Крик, расположенный в 250 км от г. Сан-Франциско (США) и занимающий площадь около 600 км² [154]. Здесь имеются многочисленные проявления Cu-Zn сульфидного оруденения, в результате выщелачивания которого значения pH вод снижаются до 5; эти воды выносят часть рудных компонентов, отлагая их в долине в виде залежей сульфатных руд. Их разработка была начата в 1895–1896 гг. открытым способом и достигла максимума (до 1000 т руды в день) в 1904 г. Позже добыча велась в 1930–1945 гг. Все это способствовало интенсивному выщелачиванию оставшихся залежей руд и отходов их плавки, что привело к загрязнению токсичными элементами окружающей местности в радиусе 15–20 км. Опробование, проведенное в 1958–1960 гг., показало, что значения pH поверхностных вод снизились здесь до 3,5–1,4. Это способствовало активному выносу металлов в поверхностные водотоки. Аналогичные процессы были отмечены в районе рудника Пен-Майн, где поверхностные воды характеризуются значениями pH 4,4–1,7. В горнорудном районе Пирамид (оз. Пирамид, шт. Невада, США), отличающегося резко аридным климатом, естественным фоном являются слабощелочные воды (pH 7,7–8,5), однако в районе действующих рудников они стали кислыми (pH в среднем 2,3). В Фостерс-Кэмп, где в 1920–1930 гг. добывались Au-Ag и Cu-Mo руды, отмечены аномально

кислые воды с pH 0,1. В одном из старых горнорудных районов Швеции, недалеко от Стокгольма, где в 1850–1902 гг. велась добыча меди, старые отвалы являются источниками поступления в водотоки кислых вод, обогащенных металлами (Al, Fe, Cd, Zn и др.); pH вод – в пределах 3,7–6,6 [147]. Процессы активного и непрерывного сернокислотного выветривания, обусловленного разработкой медно-колчеданных залежей Среднего Урала, привели к активизации миграции многих тяжелых и редких металлов [99]. В кислых рудничных водах разрабатываемых медно-колчеданных месторождений Урала концентрации кадмия находились в пределах 0,025–177,4 мг/л [96]. При этом в слабокислых сульфатных рудничных водах он преимущественно присутствовал в виде двухвалентного катиона (до 60–88%), доля нейтрального сульфатного комплекса составляла 9,2–31%. В одном из кислых рудничных ручьев, дренирующего старый горнорудный район, расположенный на о. Англии (Северный Уэльс), где до конца XIX в. добывали медную руду, концентрации тяжелых металлов достигали колоссальных значений [144]. Даже несмотря на значительное разбавление «фоновыми» притоками, в водах указанного ручья содержалось (по сравнению с местным фоном) примерно в 100 раз больше Zn, Cu и Mn. Так, в верховьях ручья и в его устье концентрации Fe в воде соответственно достигали 110000 и 11000 мкг/л; Cu – 10600 и 2850; Mn – 7750 и 2150; Zn – 21700 и 5550 мкг/л. В водах эстуария, принимающего сток ручья, также фиксировались высокие концентрации указанных металлов. Сернокислотный процесс может еще более активизироваться под воздействием пылегазовыбросов заводов по выплавке металлов, содержащих металлонесущие аэрозоли и сернистый газ [40]. В процессе аэрального переноса осуществляется окисление сернистого газа до сульфатов и соответствующее подкисление атмосферной влаги, способствующее растворению аэрозолей. Дождевая и особенно туманная влага в районах влияния таких эмиссий представляют собой в разной степени разбавленные растворы серной кислоты, которые активизируют процессы сернокислотного гипергенеза, особенно на отвалах, хвостохранилищах и загрязненных почвах. В условиях техногенеза интенсифицируются процессы внутрипочвенного выветривания, причем воздействие кислотных дождей оказывается более сильным, чем природные процессы сернокислотного выветривания, обусловленные обычным литогенезом [6, 7, 41].

Сточные воды обогатительных фабрик и металлургических предприятий, кроме рудных и сопутствующих элементов, содержат нефтепродукты и компоненты агентов флотационного обогащения, среди которых известь, сода кальцинированная, сернистый натрий, различные органические и неорганические кислоты, цианиды и другие соединения (табл. 29–31).

Расход флотореагентов может составлять сотни-тысячи грамм на 1 т руды. В процессе очистки стоков нередко образуются опасные соединения. Так, для разрушения цианидов применяется метод окисления щелочным хлорированием. Это может приводить к образованию токсичного промежуточного продукта – хлорциана, загрязнению сточных вод хлором, неполному окислению комплексных цианидов Fe^{3+} , которые остаются в виде ионов $Fe(CN)_6^{3-}$, создавая потенциальную угрозу загрязнения окружающей среды цианидами [25].

Объем рудничных и подотвальных вод Южноуральских рудных месторождений достигает 9 млн. м³/год. Минерализация их от 3 до 30–40, иногда до 365 г/л при доминировании сульфатов или хлоридов и магния или натрия. Микроэлементы в этих водах превышают фоновые для этого региона значения: Cu, Zn на 1–4 порядка, As и Cd на 1–3, Li и Be на 1–2 и т. д. [1]. На Бурбайском, Сибайском, Учалинском и других сульфидных месторожде-

ниях формируются очень кислые (рН 2–5) сульфатные воды с минерализацией до 20 г/л и высокими концентрациями железа (до 564 мг/л), меди (до 140 мг/л), цинка (до 200 мг/л) и других металлов. Наиболее геохимически активными являются подотвальные воды, их минерализация достигает 365 г/л. Все эти стоки являются причиной активной метаморфизации подземных вод.

Хвостохранилище Нерчинского полиметаллического комбината находится в Приаргунском районе Забайкальского края и сформировано из хвостов обогащения полиметаллических руд Кличкинского, Почекуевского, Савинского № 5 и других месторождений южной части Приаргунского полиметаллического пояса [119]. Площадь хвостохранилища, начало формирования которого приходится на середину 1950-х, составляет около 50 га, не считая 10,5 га отстойника фабрики по переработки флюоритовой руды. Оно состоит из трех частей, отделенных дамбами: флюоритового отстойника, который с западной стороны, примыкает к основному верхнему отстойнику, сопряженному вниз по профилю с нижним. В рельефе хвостохранилище локализовано в пади временного водотока, выходящего в долину реки Урулюнгуй (бассейн р. Аргунь). Ниже отстойника на всем протяжении пади виден шлейф желтоватого пульпового материала, который на левой стороне долины р. Урулюнгуй сформировал большой конус выноса, напоминающий дельту. Хвостохранилище и прилегающие к нему территории представляют основную опасность для окружающей среды. Наблюдается весьма сильный эоловый перенос тонкой фракции технозема за пределы хвостохранилища на окружающий ландшафт. Кроме того, установлена водная миграция пульпы по временному водотоку в долину р. Урулюнгуй. Весьма показательны данные о содержаниях рассматриваемых химических элементов в техноземах и погребенных под ними почв (табл. 32). В данном случае погребенные почвы могут рассматриваться как «фоновые», в которых уровни содержания большинства химических элементов намного ниже, нежели в так называемых техноземах. Последние образовались как вследствие прорыва дамбы хвостохранилища, так и при интенсивном эоловом переносе материала хвостохранилища. О последнем способе миграции тонкой фракции свидетельствуют обильно развитые микробарханы, сложенные тонкопесчаной фракцией, слагающей поверхность дамбы и наносов вблизи неё за пределами хвостохранилища.

Особо следует отметить, что предприятия по выплавке первичных цветных металлов, расположенные в рудных районах, являются важным источниками поступления в окружающую среду ртути. Как уже отмечалось, при обогащении руд цветных металлов ртуть переходит в концентраты (цинковый, медный, пиритный) и в их составе вовлекается в металлургический передел. Существенное количество ртути концентрируется в отходах обогащения, складываемых в районе обогатительных фабрик. Например, по оценке [122], в 2001 г. на российские предприятия по выплавке цинка, черновой меди, никеля и некоторых других цветных металлов с сырьем в общей сложности поступило более 60 т ртути. При используемых в стране технологических схемах переработки руд и концентратов цветных металлов попутная ртуть не извлекается, что обуславливает ее поступление в окружающую среду, в отходы, промпродукты и некоторую продукцию. В частности, общая эмиссия ртути только в атмосферу российскими предприятиями цветной металлургии оценивается примерно в 7,4 т, из которых около 2 т – при производстве цинка, более 1,9 т – при производстве черновой меди на уральских заводах, порядка 3,1 т – выбрасывалось предприятиями ГМК «Норильский никель» (производство меди и никеля из сульфидных медно-никелевых руд) (табл. 33).

Химический состав сточных вод меднорудных обогатительных фабрик, мг/л [106]

Компонент	Сливы со стустителей			Общий сток
	медного	цинкового	пиритного	
Грубодисперсные примеси	124	34	55970	44250
Сухой остаток	1100	2300	2180	1950
Кальций	288	1042	780	684
Хлориды	23	23	85	24
Сульфаты	403	132	268	264
Цианиды общие	3,2	0,7	0,16	0,73
Железо общее	0,3	0,3	0,3	0,35
Медь	2,2	0,1	0,1	0,43
Цинк	1,1	2,6	2,1	2,3
Пиридин	0,02	0,03	—	0,02
Ксантогенаты	2,6	0,3	1,5	1,6

Химический состав сточных вод свинцово-цинковых фабрик, мг/л [106]

Компонент	Сливы со стужителяей			Хвосты флотации	Общий сток
	цинкового	свинцового	медного		
Грубые примеси	171	151	184	64300	150000-250000
Сухой остаток	747	668	2030	695	830
Хлориды	15,6	14,3	-	33,3	29,1
Сульфаты	168	169	372	440	223
Цианиды:					
свободные	1,8	0,9	2,6	0	5,6
в комплексе	1,6	4,6	235	2,9	4,4
Cu в комплексе с цианидами	1,2	3,75	192	2,4	4,7
Zn в комплексе с цианидами	0,5	-	-	0,5	8,8
Свинец	1,5	0,43	0,14	0,37	0,8
Цинк	1,03	0,97	2,25	-	6,5
Сосновое масло	17,2	25,7	24	-	25,2
Фенолы	2,4	2,3	10,4	3,4	16
Ксантогенаты	0,6	0,3	1,9	0,14	2,4
Дитиофосфаты	2	0,5	2,5	0,05	2,3

Состав сточных вод обогатительных фабрик, мг/л (общий сток до очистки) [104]

Показатель, компонент	Редкометаллы	Вольфрам-молибденовые	Сурьмяно-рутутные	Оловянные	Медные
pH	6,5-8	9-11	8-8,3	5,9-10	11-11,8
Окисляемость	5-200	68-544	85-100	25-180	52-344
Сухой остаток	600-1300	4400-6800	400-900	190-580	1600-2647
Сульфаты	80	93-1000	135-400	3-380	1538-1700
Хлориды	70	21-100	40-60	30-50	144
Фенол	0,003	0,05	0,1-0,3	-	-
Нефтепродукты	4	29	11-50	1-5	-
Ксантогенаты	0,2	0,2-0,5	2,5	1,3	0-2,4
Медь	-	0,6	-	-	0,7
Свинец	-	0,7-1,4	-	-	0,5
Цинк	-	0,4-320	-	-	8,3
Цианиды	-	0,4	-	-	0
Марганец	-	64,5	-	-	0
Бериллий	-	-	-	-	-
Фтор	-	3,4-23	-	-	2,3

Таблица 32

Среднее содержание химических элементов в технозомах и погребенных почвах в районе хвостохранилища Нерчинского полиметаллического комбината, мг/кг [119]

Участок	Zn	As	Pb	Sn	Sb	Cd	Ag	Mo
Серые технозоны (пulpы) северной чаши хвостохранилища	2196,7	498,2	365,3	45,7	17,1	16,4	2,4	2,1
Темно-серые технозоны южной чаши хвостохранилища	4075	502,7	513,5	32,8	19,2	27,5	2,9	5,0
Желто-рыжие технозоны в 100 м южнее дамбы хвостохранилища	3802,5	3485	1526,9	55,8	89,5	29,9	9,3	2,4
Погребенная под технозомами почва (горизонт А1), 100 м от южной чаши хвостохранилища	79	11	12	3	3,3	0,9	0,8	1,5

Таблица 33

Эмиссия ртути при производстве первичного цинка на российских заводах в 2001 г. [122]

Предприятие	Масса Hg, поступившей с концентратами, т	Распределение ртути, т					свинцовый кек	медный кек
		в атмосферу	шлам	серная кислота	в канализацию	3		
Челябинский цинковый завод Электроцинк, Владикавказ	20	1,229	5,4	5	0,1	3	0,4	
	11	0,72	2,97	2,75	0,055	1,65	0,22	

Значительное количество ртути концентрировалось в шламах сернокислотного производства цинковых (более 8,4 т) и медных (более 6,1 т) заводов, в свинцовом (4,7 т) и медном (более 0,6 т) кеке, образующемся на заводах по выплавке цинка, а также поступало (не менее 10 т в целом по стране) в производственную (техническую) серную кислоту, получаемую на некоторых отечественных предприятиях цветной металлургии.

В районах горных разработок резко возрастают значения модулей твердого стока, которые могут превышать фоновые показатели в десятки-сотни раз, что существенно изменяет условия и геохимические последствия аллювиального седиментогенеза в горных реках. Увеличение модуля твердого стока во многом обусловлено перемещением в горнорудных районах огромных масс горных пород, а также значительной интенсификацией эрозивно-денудационных процессов в результате техногенного воздействия. Источником осадочного материала и связанных с ним загрязняющих веществ является также поверхностный (талый и дождевой) сток с рудных отвалов, дорог и других объектов, расположенных в пределах горных (земельных) отвалов. Например, исследования, выполненные в бассейне р. Норт Тау в одном из горнорудных районов США, показали, что количество взвешенных частиц и других загрязняющих веществ, поступающих за один год от точечных источников, составляли лишь около 5% от их поставки во время одного сильного ливня [142]. В аридных ландшафтах значение имеет атмосферная миграция поллютантов, в том числе эоловая эрозия отвалов и отходохранилищ. Снос твердого материала с отвалов в бассейне р. Бивер-Крик (шт. Кентукки, США) был определен в 94 т/га/год, а модуль твердого стока этой реки достигал 9 т/га/год, тогда как в природных условиях этот показатель составляет 0,09 т/га/год [5]. Мутность воды в р. Катакрик (Канада), дренирующей территорию добычи железных руд, достигала 2100 мг/л на участке протяженностью в 5 км, что обусловило красновато-коричневый цвет речной воды [149]. Модуль стока наносов в северной части Яно-Омолойского междуречья (Куларский горнопромышленный район) с наиболее эрозивноопасных водосборов превышал 20000 т/км² в год [94]. Мутность воды в верховьях ручьев достигала 500–700 кг/м³ и до 13–15 кг/м³ на нижних участках ручьев и в реках. Общий сток техногенных наносов в р. Омолой оценивался в среднем в 1 млн. т, и до 3 млн. т в многоводный год, что составляет 200–600% естественного стока наносов. Мутность воды в Омолое достигала во время паводков 0,7 кг/м³ (в естественных условиях она не превышала 0,05–0,15 кг/м³). Аномальный сток наносов привел к трансформации состава руслового и пойменного аллювия и морфологии русла. Во время паводков до 40% стока наносов из области горных работ оседало на пойме и побочнях в русле. Пойменный аллювий в прирусловой зоне стал более крупным и обогатился илстыми частицами. Галечный русловый аллювий заилился на 20% по весу. Поры между частицами аллювия были кольматированы илом, что привело к резкому изменению экологических условий для гидробионтов. В одной из рек, принимающей неочищенные и частично очищенные сточные воды медных рудников (Папуа-Новая Гвинея), количество взвеси увеличилось с фонового уровня 76 мг/л до 800 мг/л (концентрация меди во взвеси возросла с 90 мкг/кг до 1120 мкг/кг) [155]. В р. Рингароома (о. Тасмания) с 1870 г. сбрасываются отходы 50 рудников по добыче олова [148]. К настоящему времени в водоток поступило более 40 млн. м³ взвесей, загрязнивших его и обусловивших сложную динамику речного русла на участке протяженностью в 75 км. Максимальная мощность слоя аллювиальных отложений (по сути техногенных) достигла 10 м.

С.П. Горшков [29] приводит данные о том, что в карьерах в районе открытых разработок в бассейне упомянутой выше р. Бивер-Крик, мощность донных отложений (период накопления 4–6 лет) варьировалась от десятков сантиметров до 1 м. Он же приводит сведения об чрезвычайно ускоренной аккумуляции наносов на западном склоне хребта Сьерра-Невада, где в 1849–1914 гг. велась интенсивная гидравлическая разработка россышей. В р. Сакраменто и ее притоки было сброшено более 1,13 км³ твердого материала, что вызвало ускоренную аккумуляцию в днищах долин, включая низовья реки. На плесах рек Черни и Оскольца (район КМА) толщина слоя ила, накопившегося ниже сброса шахтных вод, достигала 0,4–0,6 м.

Изменение режима твердого стока и поступление в водотоки значительных масс осадочного материала, в том числе в составе разнообразных техногенных стоков, отличающегося специфическим вещественным составом, играет важную роль в формировании их эколого-геохимических особенностей. Резкое увеличение количества переносимых водотоками взвешенных наносов в горнорудных районах обуславливает ведущую роль транспорта химических элементов во взвешенных формах миграции. Протяженность потоков рассеяния во взвешенной форме для горнодобывающих и металлургических предприятий составляет 20–30 км, в растворенных формах намного меньше. Безусловно, именно за счет высоких концентраций и значительных масс взвешенных форм элементов и происходит образования интенсивных и протяженных геохимических аномалий в донных отложениях рек. Уровни металлов, протяженность и устойчивость (во времени) техногенных гидрохимических аномалий (особенно во взвеси) возрастают в ряду воздействия «разведка – добыча – обогащение – переработка руд». Существенные изменения наблюдаются в общем составе речных вод. Отметим, что Л.А. Филипповой [111] на одной из малых рек Забайкалья (район оловянно-полиметаллического месторождения) был установлен интенсивный поток рассеяния Pb, Zn, Sn и Ag в речной взвеси, связанный с воздействием сбросов с обогатительной фабрики. Концентрации Pb, Zn, Sn во взвеси достигали 0,1%. Высокие концентрации указанных элементов во взвеси фиксировались на протяжении 20 км вплоть до впадения в водоток следующего порядка.

В горнорудных районах в речных отложениях практически всегда формируются интенсивные, комплексные по составу и достаточно протяженные техногенные геохимические аномалии (техногенные потоки рассеяния). Особенности концентрирования и распределения химических элементов и формирования техногенных потоков рассеяния в отложениях горных рек рассмотрим на основе материалов, полученных в Северной Осетии, где длительное время разрабатывались полиметаллические месторождения [86, 101, 120, 131, 134, 137, 138] и Кабардино-Балкарии, где эксплуатировалось молибден-вольфрамовое месторождение [86, 95]. Донные отложения рек горнорудных ландшафтов Северной Осетии отличаются высокими концентрациями целого ряда химических элементов (прежде всего, типоморфных для полиметаллических месторождений) (табл. 34).

Наблюдается направленное увеличение интенсивности и масштабов техногенного загрязнения в ряду воздействия следующих источников: «природные (рудогенные) – геологическая разведка – добыча – обогащение – переработка полиметаллических руд». Особенно существенно в указанном ряду воздействия увеличивается протяженность техногенных геохимических аномалий (техногенных потоков рассеяния). Так, если прослеженная протяженность природных геохимических аномалий (рудогенных потоков рассеяния) составляет, как правило, первые сотни метров, то длина техноген-

ных потоков рассеяния достигает несколько десятков километров. Одновременно резко меняются соотношения между концентрациями химических элементов, характерные для рудогенных аномалий. Показательно, что степень концентрирования многих рудных элементов-примесей в техногенных аномалиях выше, нежели в их природных аналогах. В свою очередь, уровни содержания некоторых химических элементов в техногенных образованиях (шламах, техногенно измененных речных отложениях) не уступает их валовым концентрациям в полиметаллических рудах. Техногенное воздействие уже проявляется в районах проведения геологоразведочных работ и существенно усиливается в зонах влияния горнодобывающих предприятий. При входе водотока (в данном случае р. Кутардон) в зону влияния техногенеза (горные выработки, шахты и т. п.) в русловых отложениях наблюдается существенное (в несколько раз) возрастание концентраций основных рудных элементов, прежде всего, цинка и свинца (Рисунок 3.56). Очень интенсивные, протяженные и стабильные техногенные аномалии указанных металлов установлены в русловых отложениях р. Ардон. Так, до впадения р. Садонки уровни содержания металлов в русловых отложениях Ардона находятся в пределах фоновых концентраций или незначительно (в 1,5–2 раза) превышают их. При вхождении в зону влияния Садонского рудника, Мизурской обогатительной фабрики и хвостохранилищ их концентрации резко возрастают (в 50–200 раз выше фона). Техногенные геохимические аномалии (особенно цинка и свинца) очень стабильны в пространстве, прослеживаются практически (закономерно снижаясь при незначительной вариации вниз по потоку) по всей длине Ардона (более 40 км) и фиксируются в русловых отложениях Терека.

Тырныаузское вольфрам-молибденовое месторождение расположено в левом борту долины р. Баксан в 2 км северо-западнее г. Тырныауз на высотах 2000–3200 м, примерно в 40 км к востоку от горы Эльбрус и около 55 км западней г. Нальчика (Кабардино-Балкария) [60, 81, 82]. На месторождении также учтены балансовые запасы меди, висмута, золота и серебра. Оно относится к скарново-шеселитовому типу. Скарновое тело месторождения приурочено к контакту толщи ороговикованных песчаников и сланцев с метаморфизованными известняками и имеет форму антиклинальной складки; рудные тела – крутопадающие, мощностью до 130 м. В скарнах присутствуют значительные количества рудных минералов – шеселита, молибденита, сфалерита, висмутина и др. Прямое воздействие Тырныаузского ГМК (ТГМК) на окружающую среду связано с механическим нарушением земель (более 170 га), обусловленного изъятием больших объемов горных пород при добыче руды и их перемещением (в отвалы и хвостохранилища) при ее обогащении (к середине 1980-х гг. в отвалах было накоплено более 30 млн. м³ пустых пород) [95]. Косвенное воздействие горнодобывающей деятельности проявляется в изменении условий миграции химических элементов и в формировании техногенных геохимических аномалий. Изменение условий механической и водной миграции обусловлено несколькими причинами: 1) перемещение больших масс горных пород под действием гравитационных процессов, сопровождающееся формированием постоянно действующего «антропогенного Мукуланского села», 2) разрушение хвостохранилищ под действием различных природных факторов (эрозионных, селевых и пр.), 3) различные сливы с рудника, обогатительной фабрики и хвостохранилищ. В воздушную миграцию вещество вовлекается в результате потерь в технологической цепи на стадиях добычи и обогащения. Особенно интенсивно поступление пыли в атмосферу происходит при проведении

взрывных работ в карьере, при загрузке и разгрузке автомашин, из вентиляции шахт рудника и обогатительной фабрики, при дроблении руды, при загрузке концентрата, при эоловом переносе с поверхности хвостохранилищ. Изучение состава пылевывбросов, образующихся на различных стадиях технологического процесса, установило широкую ассоциацию концентрирующихся в промышленной пыли химических элементов (табл. 35). Важной особенностью геохимических ассоциаций в пыли является наиболее интенсивное концентрирование в ней Bi, Sb, As, W, Mo, Sn, в меньшей степени Pb, Zn, Ag. Показательно, что большинство элементов, являющихся ведущими в геохимических ассоциациях, сопутствуют основному оруденению. Наиболее резко концентрируются элементы в пыли, образующейся при дроблении руды, на метателях с грохотов на мельницы и при сушке и загрузке концентратов, т. е. на начальных и конечных стадиях производственного цикла. Специфично появление высоких концентраций ртути в пылевывбросах шахты, а также Cd и In при сушке и загрузке медно-висмутитового концентрата.

Высокая пылевая нагрузка в районе ГМК в значительной степени обуславливает намного более интенсивную поставку в ландшафты химических элементов по сравнению с условно фоновыми территориями (табл. 36).

Сток наносов реки Баксан формируется по всей площади водосбора, в пределах которой развиты плоскостной смыв, линейная эрозия. Сток взвешенных частиц в течение года неравномерен. Большая часть твердого стока приходится на половодья и паводки. Максимальный расход наносов в Баксане наблюдается в июле (до 340 кг/сек), минимальный – в январе (0,11 кг/сек). Разработка месторождения и сброс сточных вод привели к заметному росту твердого стока (примерно в 3–5 раз) Баксана [113]. В 1958 г. осуществлен разрыв старого хвостохранилища ТВМК, что обусловило поступление значительных масс твердого материала в реку. По данным [48], Тырныузская обогатительная фабрика выдавала ежедневно более 30 тыс. м³ хвостов, содержащих до 30% твердого вещества с концентрацией вольфрама 0,03% и молибдена 0,025%. В жидкой осветленной фракции содержание вольфрама составляло 9 мг/л, молибдена 6,9 мг/л.

Воды р. Тырныуз и особенно ее правых притоков, дренирующих Тырныузское вольфрамово-молибденовое месторождение, отличаются высокими уровнями молибденом [21, 112]. Так, в верховьях указанных водотоков были зафиксированы концентрации этого металла, варьирующиеся от 0,325 до 1,8 мг/л; достаточно высокими они оставались и в устьях притоков (0,5–2,1 мг/л). В устье р. Тырныуз (выше места сброса фабричных вод) уровни Мо достигали ~ 0,5 мг/л. Наиболее высокие содержания его были обнаружены в пробах воды, отобранных в горных выработках (до 10–15 мг/л). Твердая часть различных стоков и сливов (т. е. взвесь) характеризуется присутствием очень высоких концентраций многих химических элементов (табл. 37).

В пределах фоновых участков в русловом аллювии кларки концентрации химических элементов невелики (табл. 38). В геохимическую ассоциацию входят химические элементы, отражающие геохимическую специализацию горных пород (граниты и андезиты), слагающих водосборные территории. В зоне влияния горного производства в донных отложениях водотоков наблюдаются намного более интенсивные и более разнообразные по качественному составу геохимические аномалии. Особенно высок уровень накопления элементов в русловых отложениях на участке реки ниже поступления стоков из хвостохранилища. Ведущими элементами геохимических ассоциаций в донных отложениях закономерно являются главные металлы руд – W и Mo, в зоне влияния добычных работ значимы также Sn, Pb, V, Ga.

Геохимические ассоциации в донных отложениях горных рек
(обобщенные данные по Северной Осетии)

Источник воздействия (период)	Порядок значений K_c химических элементов								Длина, км	Z_c
	>100	100–30	30–10	10–3	3–1,5					
Природные	–	–	–	–	–	–	–	–	0,1–0,6	10
Разведочные выработки	–	–	–	Pb	Zn-Cu-Ag-Bi				1–3	18
Горнорудные (20 лет)	–	–	Zn-Ag	Pb	Cu-Nb-Ga-Y-As				5*	65
То же (35 лет), Кутардон	–	–	Zn	Pb-Ag	Ba-Nb-Cu-Y-Sr-Bi-As				6**	52
То же (150 лет), Садонка	–	Pb	Zn	Ag-Cu	Ga-Ni-Co-Sn-Bi-Nb-As				> 6	130
Горнообогатительные (15 лет)	–	–	Zn	Pb-As	Y-Cu-Sr-Ag-Co-Ba-Sb-Bi				> 40	60
То же (90 лет), Мизурская ОФ, Ардон	–	Zn-Ag-Pb	Cu	Ba-Bi-Cd-As	Mn-Mo-Sn-Co-Zr-Nb-Hg-Sb				> 60	295
Материал из хвостохранилищ	Ag	Pb-Cd	Ba-Zn-Cu-As	Bi-Mo-Sb	Sn-Co-Nb				–	800
Полиметаллические руды	Cd-Zn-Ag-Pb	Cu-Bi	Mo	Sn-Co	Y-Ga-Sr				–	7500
Шламы завода «Электроцинк»	Ag-Cd-Zn-Pb	Cu-Mo	Co-Sn-Ni	Mn-Bi	W				–	6500

* Прослеживается в водотоках 1-го порядка до устья; ** фиксируется в водотоке следующего порядка.

Геохимические ассоциации элементов в пылевых выбросах ТГМК [86, 87]

Источник	Порядок значений кларков концентрации элементов				
	>10000	10000–1000	1000–100	100–10	10–1
Карьер Шахта	Bi	–	As-Sb-Mo-Sn	W-Pb-Zn-Cu	B-Ag-Mn-V-Co-Ba-Ga
	Bi	Hg	W-Mo-Sb-As	Sn-Ag-Pb	Zn-Cu-Mn-B
Обогатительная фабрика: дробление грохочение металлы с грохотов на мельницы Сушка и загрузка концентрата: молибденовый WO ₃ -промпродукт Cu-Bi концентрат	Bi	Sb	W-Pb-Mo	Sn-Ag	Zn-Cu-Mn-B
	–	Bi	W-Mo-Sb	Sn-Pb	Ge-Zn-Mn-Cu-Ag-V
	Bi	–	Pb-Sb-W-Mo	Sn-Sc	Ag-Mn-Cu-V
	Bi	As	Sb-W-Mo	Ag-Sn-Pb	Cu
	–	Sb-Bi	W-Pb-Mo	Ag-Zn	Ge-Sn
	Bi	As-Cd-Ag	Sn-W-Pb-Zn-Mo-Cu	In	Co-Ni-Nb-Cr-V-Mn-P

Поступление твердого вещества и связанных с ним металлов со снегом в районе молибден-вольфрамового горно-обогатительного комбината, Тырныауз [95]

Место	Пыль, мг/м ² /сут	Металлы, $\rho \cdot 10^6$ мг/м ² /сут			
		Mo	W	Sn	Cu
Верховья Баксана, до 50 км от ТГМК Там же Карьер Мукуланский Хвостохранилище-I	22,3	400	4000	670	6700
	23,7	100	480	350	2370
	16378	1600000	1640000	164000	1147000
	1361	39000	40800	40800	40800

Геохимические ассоциации элементов в твердой части стоков ТГМК [86]

Источник (откуда – куда)	Порядок значений кларков концентрации элементов		
	10000–1000	1000–100	100–10
С обогатительной фабрики в хвостохранилище	Bi	Sb	Sn-W-Mo
Из хвостохранилища в водоток	Bi	W-Sb-Sn	Mo-Zn
Из водотока в главную реку	Bi	Sb	W-Mo

Примечание. Распределение мышьяка и ртути не изучалось.

Геохимические ассоциации в речных отложениях бассейна Баксана [95]

Место	Порядок значений кларков концентрации				
	>100	100–10	10–5	5–3	3–1
Верховья Баксана	–	–	–	–	Pb-Ga-V-Sn-Mo-W-B
Баксан, ниже добычи	–	W	–	Sn-Pb	V-Ga-Mo-Ag-Cu-B-Zn-La-Zr
Баксан в черте г. Тырныауза	–	W-Mo	Sn	Pb	V-Ga-Cu-Ag-Zn-B-La-Zr-Co
Баксан, участок город-хвостохранилище	W	Mo	–	Sn	Pb-V-Ag-Ga-Zr-Zn-B-La
Баксан, 30 км ниже хвостохранилища	–	W	Mo	Sn	Pb-V-Ga-B-Ag-Zr
Притоки вне зоны техногенеза	–	–	–	–	Pb-B-V-Sn-Ga-Mo

Примечание: Распределение As, Bi, Sb и Hg не изучалось.

Техногенные потоки рассеяния в руслах рек горнорудных районов могут простираться на значительные расстояния. Так, в Бурятии был установлен поток Mo, W, Au и других элементов, протяженностью более 200 км, что было обусловлено размывом хвостохранилищ и аварийными сбросами обогащательной фабрики [73]. За 30 лет разработки обогащения руд золото-кварцевого Ирокиндинского месторождения в отложения р. Ирокинды сформировался поток рассеяния Au и Hg протяженностью более 15 км; в головной части потока присутствуют также Pb, Zn, As и другие элементы, входящие в состав руд [100]. Показательно, что техногенный поток золота (0,5–4 г/т) перекрыл природный с концентрацией Au в отложениях в пределах 0,008–0,2 г/т. Интенсивные и протяженные техногенные потоки химических элементов формируются в зоне влияния Алавердского горно-металлургического комбината (табл. 39). В данном случае высокий уровень загрязнения русловых отложений прослеживался от комбината на всем изученном участке русла р. Дебет (примерно 40 км) и фиксировался дальше, уже в пределах Грузии. При этом, если на участке реки от г. Кировокана до г. Алаверди значения Zc в донных отложениях редко превышали 16, то ниже комбината (на 3-км участке) они достигали 1100, затем резко снижались до 128 и варьировались на изученном 40–км отрезке русла Дебета в пределах 128–256.

Таблица 39

Средние содержания химических элементов в донных отложениях р. Дебет в районе Алавердского горно-металлургического комбината, мг/кг (по данным ИМГРЭ)

Элемент	Выше комбината	Ниже комбината
Медь	120	1891
Цинк	200	1600
Мышьяк	–	160
Молибден	2	22
Серебро	0,08	0,4
Кадмий	–	13
Сурьма	–	35
Свинец	40	292
Висмут	–	1,6

Высокие уровни содержания целого ряда химических элементов отмечены в техногенных илах р. Карагайлы (Башкирское Зауралье) в зоне влияния эксплуатируемых полиметаллических медно-цинковых и никель-кобальтовых месторождений (табл. 40).

Даже после отработки районы рудных месторождений отличаются высокими уровнями многих химических элементов в поверхностных водах. Например, мутность воды р. Ред Ривер, дренирующей старинные разработки олова на полуострове Корнуолл (Англия), достигала 30 г/л; взвесь обогащена Fe₂O₃ (до 10%) и содержала в повышенных концентрациях целый ряд химических элементов, в том числе, рубидий (187 мг/кг), кобальт (41), медь (992), мышьяк (10000) и олово (2000 мг/кг) [150]. Джидинское молибдено-вольфрамовое месторождение и связанные с ним россыши расположены в северных отрогах Джидинского хребта и разрабатывались Джидинским вольфрамо-молибденовым комбинатом с 30-х годов прошлого столетия. После закрытия производства в 1997 г. основными источниками загрязнения водных объектов территории продолжают оставаться отходы обогащения руд, отвалы горных пород, дренажные рудничные воды [9]. Поверхно-

стные воды данного района отличаются высокими концентрациями алюминия (17 ПДК), кадмия (170 ПДК), марганца (40 ПДК), хрома (3–5 ПДК), кобальта, меди и свинца (уровень ПДК), сульфатов (до 700 мг/л), фтора (до 6 мг/л), нефтепродуктов (до 2 мг/л). Ретроспективные данные указывают на то, что многие из указанных ингредиентов в еще более высоких концентрациях содержались в рудничных водах месторождения.

Таблица 40

Химические элементы в техногенных илах р. Карагайлы, мг/кг (n = 17) [72]

Элемент	Илы		Кларк литосферы	Коэффициент концентрации
	мг/кг	V, %		
Co	39	51	18	2,2
Ni	48	75	58	0,8
Zn	3622	62	87	72,1
Cu	4797	89	47	102,0
Mn	980	46	1000	0,98
Cr	70	73	83	0,8
Pb	118	174	16	7,4
As	244	62	1,7	143,5
Cd	19	128	0,13	146,2
Hg	2,44	85	0,083	2939

В Комсомольском районе Приморского края около 60 лет разрабатываются (открытым и закрытым способами) оловянные, медно-оловянные и олово-полиметаллические месторождения [44]. Руды перерабатывались комплексно с извлечением Sn, Cu, Pb и Zn. Сейчас все месторождения в районе (кроме Фестивального) закрыты, хотя запасы руд не отработаны. Здесь имеется две обогатительные фабрики, из которых в настоящее время работает одна, и три хвостохранилища. Первое хвостохранилище находится рядом с фабрикой и в непосредственной близости с пос. Горный (около 100 м). Отходы там накапливались с 1963 по 1997 г., его площадь 20 га, объем 10,4 млн. т, среднее содержание олова в хвостах 0,13%. Второе – расположено около другой фабрики вблизи г. Солнечный (500–700 м). Здесь отходы накапливались с 1969 по 2001 г. Оно по площади самое большое – 40,3 га, объем 24,09 млн. т, среднее содержание олова в хвостах – 0,207%. Хвосты на этих двух хвостохранилищах находятся в сухом виде. Третье хвостохранилище – самое молодое – закрыто сверху шламовыми водами. Объем его составляет 6,8 млн. т, площадь 30,5 га, находится оно в 5 км от пос. Горный. Развитие горнорудной промышленности привело к появлению многочисленных канав, расчисток, карьеров, штолен и хвостохранилищ, что способствовало созданию горнопромышленной техногенной системы площадью десятки гектар, в пределах которой, в сущности, расположены пос. Горный и г. Солнечный. Хвосты отличаются высокими концентрациями не только олова, но и меди (0,13–0,38%), цинка (0,11–0,25%), свинца (0,03–0,32%), мышьяка (0,20–0,69%), серы (1,87–1,94%) и некоторых других элементов и их соединений. Из-за увеличения поверхности соприкосновения открывающихся сульфидных руд в горных выработках и отходов горнорудного производства (хвостов) с агентами выветривания (кислород, поверхностные воды и т.д.) гипергенные процессы активизируются. Главными

сульфидными минералами, которые в процессе гипергенеза интенсивно окисляются, являются пирит, пирротин, арсенопирит, халькопирит, галенит и сфалерит. Скорость окисления сульфидов зависит от многих факторов: влажности хвостов, их рыхлости, температуры, давления, окислительно-восстановительного потенциала и др. Процесс окисления хвостов происходит в основном на поверхности хвостохранилищ, поскольку содержание кислорода с глубиной резко снижается. По экспериментальным данным до 35% сульфидов, находящихся при постоянном контакте с воздухом и при достаточном количестве влаги, окислится за 6 месяцев. Толщину окисленного слоя можно получить, учитывая коэффициент диффузии кислорода, влажность и рыхлость хвостов, скорость растворения и последующего смыва дождевыми водами минералов, содержащихся в хвостах. Расчет показал, что ежегодно в гидросферу выносятся значительная масса элементов (табл. 41). По оценкам авторов цитируемой статьи, полное окисление сульфидов хвостов на хвостохранилище СОФ при наиболее благоприятных условиях произойдет за 210 лет. Медь из хвостохранилища ЦОФ в гидросферу будет поступать в течение 160 лет, цинк 205, свинец 210, а железо 200 лет. Полное окисление сульфидов хвостов на хвостохранилище при наиболее благоприятных условиях произойдет за 170 лет. Загрязнение медью будет продолжаться в течение 30 лет, цинком 160, а свинцом и железом около 170 лет.

Таблица 41

**Ежегодное поступление химических элементов
из хвостохранилищ в гидросферу, кг [44]**

Элемент	СОФ	ЦОФ
Fe	7	294
Cu	21	9552
Zn	1469384	24168
Pb	144331	43844
Срастворенная	108457034	421002000

Сравнительная оценка распределения химических элементов в рудогенных и техногенных потоках рассеяния в донных отложениях водотоков показывает, что техногенные потоки по уровням содержания элементов и протяженности аномалий не только не уступают, но часто значительно превосходят рудогенные (табл. 42).

Данные А.Ю. Опекунова [72] свидетельствуют о том, что в горнорудных районах в зонах техногенеза происходит трансформация баланса форм нахождения химических элементов в донных отложениях рек. Так, если в природных условиях явно доминируют устойчивые, прочносвязанные формы изученных металлов, то в условиях загрязнения существенно возрастает доля их более подвижных, геохимически активных форм (прежде всего, за счет увеличения количества обменных, в меньшей степени карбонатных форм и форм, связанных с органическим веществом). Это свидетельствует о возрастании геохимической активности металлов и об увеличении значимости донных отложений как вторичного источника загрязнения водной массы и биоты [133].

Уровни содержания металлов в донных отложениях рек рудогенных и техногенных районов, мг/кг
(обобщение литературных данных [86])

Месторождения и предприятия	Pb	Zn	Cr	Ni	Ag
	Рудные месторождения				
Полиметаллические, Вост. Забайкалье	30-300	100-2500	-	-	-
Полиметаллические, Сев. Тянь-Шань	200-300	2000-3000	-	-	-
Железорудные, Сев. Тянь-Шань	-	-	1000-3000	500-2000	-
Сульфидные, Алтай	200	300	-	-	30
Олово-рудные, Сихотэ-Алинь	60-300	1000-3000	-	-	30
Полиметаллические	100-2000	100-5000	10-100	10-100	-
	Техногенные источники				
Горнодобывающие предприятия, Сев. Айдахо	300-6300	3200-4700	-	-	6-15
Рудник добыче цинка и свинца, Польша	1200	10000	58	50	-
Горно-обогатительная фабрика, Польша	420	10000	58	26	-
Горно-обогатительная фабрика, полиметаллические руды, Сев. Осетия	до 2500	до 15000	-	-	-

Исследования форм нахождения элементов в донных отложениях водотоков и почвах Прииртышском районе Рудного Алтая, где более 200 лет осуществляются добыча и переработка минерального сырья, позволило установить следующие признаки техногенного загрязнения [105]: а) обилие токсикантов в виде фаз чистых металлов, б) структурные особенности минералов, выраженные в образовании неустойчивых, слабо сконденсированных, коллоидных агрегатов, разрушающихся под воздействием электронного пучка, в) морфологические особенности, проявленные в нехарактерных для природных выделений образованиях (волосовидные, спутанно-волоконистые), г) наличие минералов и других выделений, имеющих техногенную природу. Особенно показательно существенное накопление меди, цинка и свинца в техногенных аномалиях (почвы и донные отложения) в формах, связанных с оксидами марганца и железа, органическим веществом, абсолютные концентрации которых в десятки и сотни раз превышали фоновые уровни. Для почв и донных (руслowych) отложений в зоне загрязнения было также характерно высокое содержание карбонатных и ионообменных форм.

В работе [46] экологические последствия добычи вольфрам-молибденовых руд рассмотрены на примере Джидинского вольфрам-молибденового комбината (Закаменский район Республики Бурятия). Комбинат был создан в 1934 г. на базе Джидинского рудного узла, объединяющего Первомайское молибденовое месторождение и вольфрам-молибденовые месторождения Холтосон и Инкур. В предвоенные и военные годы комбинат занимал ведущее положение в стране по производству вольфрамового концентрата. Добыча его в 1934 г. составила 73,5%; в 1935 г. – 65,7%; 1937 г. – 50%; 1944 г. – 40% от общего объема выпущенного в бывшем СССР вольфрамового концентрата. В послевоенные годы комбинат наращивал производственные мощности по выпуску вольфрамовых и молибденовых концентратов. В 1973 г. был закрыт Первомайский рудник ввиду полной отработки молибденового месторождения. С 1972 г. начала действовать Инкурская обогатительная фабрика, которая в течение первого года перерабатывала бедные руды старых холтосонских отвалов. В 1973 г. начал выдавать руду Инкурский рудник и фабрика перешла на освоение технологии ее переработки. К 1974 г. была завершена реконструкция бывшей молибденовой фабрики, которая была переведена на обогащение вольфрамовых руд. С этого времени комбинат добывал и перерабатывал только вольфрамовые руды. Джидинский прекратил свою деятельность в 2007 г. (в связи с нерентабельностью производства). При закрытии комбината не были соблюдены необходимые санитарные и экологические требования. Так, 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 и на прилегающих территориях и др. Все это привело к тому, что с прекращением деятельности комбината отрицательное воздействие его отходов на окружающую природную среду и население не только не уменьшилось, а значительно возросло. За период работы комбината на территории 12 км² образовалось 44,5 млн. т складированных в двух хранилищах отходов. Особую опасность представляет вывезенное из эксплуатации хранилище, где хранится более 10 млн. т отходов. Кроме хвостохранилищ к опасным объектам могут быть отнесены и обвалывающие их дамбы, породы которых в результате взаимодействия с илами хвостохранилищ разрушаются и становятся дополнительным источником выноса вредных компонентов. На протяжении многих

лет отходы являются источником загрязнения г. Закаменска, р. Модонкуль и ее притока – руч. Инкур. Кроме того, люди стихийно начали извлекать руду и вольфрамовый концентрат, в результате чего в период с 2000 по 2008 гг. здесь погибли в результате обвалов шесть человек в возрасте от 17 до 28 лет. В вольфрамо-молибденовых рудах содержатся свинец, цинк, фтор, молибден, бериллий, вольфрам, рутений, цезий. Технология извлечения вольфрамового концентрата предусматривала использование серной кислоты, ксантогената и керосина. Вследствие того, что ранее перерабатывались более богатые руды, в отвалы отправлялись породы с большими концентрациями сульфидов. Окисление сульфидных минералов рудного поля с образованием серной кислоты и выносом опасных для окружающей среды химических элементов с отвалов шахтными, карьерными и инфильтрационными водами привело к загрязнению ряда водотоков бассейна р. Джиды (реки Инкур, Барун-Нарын, Зун-Нарын, Модонкуль, Гуджирка и Мырген-Шено). 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 ПДК, меди – 19840 ПДК, кадмия – 1120 ПДК, никеля – 56 ПДК, хрома – 525 ПДК, мышьяка – 11 ПДК. В водах, вытекающих из-под хвостохранилищ и отвалов некондиционных руд, превышение ПДК зафиксировано по алюминию – в 17, кадмию – 40, цинку – 7; фтору – 4; нефтепродуктам – 24; меди и селену – 2 раза. Результаты эколого-геохимической оценки почвенного покрова в районе Джидинского комбината показали превышение ПДК по никелю в 3–5, меди – 1,5–3, свинцу – 1,5–10, цинку – 2, кобальту – 3 раза, марганцу – до 2 раз. Установлено, что зона загрязнения почв захватывает более половины г. Закаменска. Уровень загрязнения воздуха оценивается как высокий (в результате ветрового переноса пыли с хвостохранилищ приземные концентрации достигают 15 ПДК). Из-за находящихся на г. Закаменск песчаных отходов комбината зона загрязнения экологически опасными веществами с суммарным коэффициентом их концентрации 32–128 раз охватывает почти половину территории города. Основные поллютанты: вольфрам, молибден, бериллий, свинец, цинк и другие. Уровень загрязнения воздуха оценивается как высокий, в отдельные периоды – как очень высокий (особенно в результате ветрового переноса пыли с хвостохранилищ).

4.3. Формирование региональных зон техногенного загрязнения

Активная горнодобывающая и горнометаллургическая деятельность способна оказывать влияние на очень значительные территории. Примером может служить Карело-Кольская металлогеническая провинция. Так, оценка техногенной нагрузки горнодобывающей (и горнометаллургической) отрасли на природную среду Мурманской области показала [62, 63], что районы максимального загрязнения почв соединениями тяжелых металлов приурочены к местоположению горнопромышленных предприятий и проявляются на значительной территории. В качестве индикатора техногенного воздействия на почву в условиях многокомпонентного загрязнения Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, использовался известный суммарный показатель загрязнения (показатель Саета). Область чрезвычайно опасного, высоко опасного уровней загрязнения охватывает крупные промышленные центры. Менее освоенным в хозяйственном отношении восточным и западным территориям Кольского полуострова соответствуют допустимые уровни загрязнения тяжелыми металлами.

В Карело-Кольском регионе выявлено значительное количество интенсивных геохимических аномалий в органическом горизонте почв [28]. Эти аномалии обусловлены двумя источниками: техногенными (различные промышленные предприятия, железнодорожный и автомобильный транспорт, хозяйственная деятельность населения) и естественными (рудогенные геохимические аномалии, месторождения и рудопроявления полезных ископаемых, а также геохимические специализированные геологические образования). Площади неудовлетворительного экологического состояния занимают 30% площади территории. Основными источниками загрязнения всех компонентов природной среды являются горнодобывающие, перерабатывающие и металлургические производства. Вокруг медно-никелевого комбината (г. Мончегорск) выявлена обширная площадь интенсивного загрязнения SO_2 , Ni, Cu, Co, Cr. Разработка и обогащение апатит-нефелиновых руд в гг. Кировск и Апатиты вызвало интенсивное загрязнение Sr, Ba, Zn, Ni, Cu, Mn, Pb в почвах. С деятельностью Ловозерского ГОКа (пос. Ревда) связано загрязнение окружающей среды редкими землями, Mo, Zn, Pb, Sr, Ni, Mn. Почвы и донные отложения вокруг г. Кандалакша, где расположено алюминиевое производство, загрязнены Zn, Sb, W, Ni, Mo, Cr, Cu, Co, Mn, Pb, Ba. Вокруг Ковдорского железорудного ГОКа почвы интенсивно загрязнены Mo, Ni, Cr, V, Co, Pb, Mn, Cu, Zn.

В общем случае в горнопромышленных районах можно выделить три-четыре ландшафтно-функциональных зоны техногенной геохимической трансформации природных комплексов [49, 87]. Первая зона – это шахтно-карьерно-отвалы горнопромышленные ландшафты с практически полной деградацией почвенно-растительного покрова с высокими концентрациями металлов в пыли, техногенных наносах, водах и растениях. Вторая зона – горнопромышленные ландшафты на месте и в сфере непосредственного влияния горнопромышленных комбинатов и обогатительных фабрик, претерпевшие полную или значительную перестройку первоначальной структуры за счет отчуждения площадей под предприятия и загрязнения токсичными выбросами, отходами и стоками. При обогащении руд расширяется ассоциация и увеличиваются концентрации многих элементов-загрязнителей. Содержание пыли и тяжелых металлов в воздухе этих экологически опасных зон в радиусе до 2–3 км нередко превышает их ПДК на 1–2 порядка. Интенсивность аномалий металлов, как правило, убывает в ряду выбросы – атмосферные выпадения (снег) – почвы. Площадь и конфигурация аномалий зависят от характера и способа поступления поллютантов в атмосферу (мощность взрывов в карьерах, высота фабричных труб), метеорологической ситуации (направление и скорость ветра, частота инверсий), геоморфологических условий (равнины, горы). В общем случае содержание загрязняющих веществ уменьшается от «точечных» отдельно стоящих источников (какими в основном являются горнопромышленные предприятия) по экспоненте, то есть когда интенсивность загрязнения воздуха обратно пропорциональна квадрату расстояния от техногенного источника. Загрязнение почв и растений обычно подчиняется той же зависимости, но местами имеет и более сложный характер. Первая и вторая зоны по сути представляют собой техногенную пустыню. Третья зона достаточно сильного загрязнения воздуха, почв, снега и растений в равнинных районах захватывает расположенные вблизи месторождений и комбинатов сельские и пригородные ландшафты в радиусе 3–5 км. Ассоциация загрязнителей сокращается, их концентрации, как правило, на порядок меньше, чем в первых двух зонах. В горных ландшафтах зоны загрязнения интерфериру-

ют поперек долины и не выходят на водоразделы. Велико значение экспозиции склонов. В продольном профиле долин загрязнение прослеживается вниз по течению в водах (взвесь) и донных отложениях на расстоянии 10–15 км. Четвертая зона умеренного площадного загрязнения имеет нестабильные очертания и располагается в радиусе от 3–5 до 10–20 км. Особенно критическая экологическая ситуация возникает при разработке крупных рудных месторождений в горных долинах, когда перемещение токсичных отходов по долине приводит к формированию значительных по площади и контрастности долинных геохимических аномалий вблизи горнорудных городов и поселков. Фоновые ландшафты обычно расположены не ближе 15–20 км от источников рудных выбросов и стоков. Третья и четвертая зоны заняты так называемыми дефолируемыми ландшафтами (рис. 6). Как правило, техногенные геохимические ореолы обычно имеют зональное строение: непосредственно вокруг источника загрязнения формируются полиэлементные аномалии металлов, на удалении – би- и моноэлементные (рис. 7). Особенно контрастные техногенные аномалии сульфидов и сульфатов Pb образуются вокруг комбинатов по производству цветных металлов. В отходах свинцовой плавки, шлаках очистных сооружений, гальванических стоках его содержание достигает сотен и тысяч кларков концентрации.

Необходимо отметить, что формирующиеся техногенные геохимические зоны могут накладываться на так называемые биогеохимические провинции, т. е. области на поверхности Земли, существенно отличающиеся от соседних областей уровнями содержания химических элементов в горных породах, почвах, природных водах, что вызывает различную биологическую реакцию со стороны местной флоры и фауны, включая человека [124, 126]. Концепция биогеохимических провинций была сформулирована в 1930-х гг. А.П. Виноградовым и получила дальнейшее развитие в работах В.В. Ковальского и его последователей. В настоящее время биогеохимические провинции рассматриваются как специфические (атипичные) экосистемы в пределах континентов и классифицируются по различным признакам (табл. 43).

В крайних случаях в пределах конкретных биогеохимических провинций возникают биогеохимические эндеми, т. е. массовые заболевания растений, животных и человека, обусловленные резкой недостаточностью или избыточностью содержания какого-либо химического элемента (или группы элементов). Например, при недостатке кобальта, меди, йода, селена у людей и животных развиваются эндемический зоб, акобальтозы, атаксия, миопатия. При избытке урана, стронция, молибдена, свинца, фтора, меди, никеля, селена проявляются хондродистрофии, флюороз, другие заболевания и токсикозы. Различают зональные (в пределах почвенно-климатических зон) и интерзональные (встречающиеся практически в любой природной зоне) биогеохимические провинции. Так, для зон подзолистых и дерново-подзолистых почв Северного полушария, простирающихся через всю Евразию, характерны биогеохимические провинции, связанные с недостаточностью йода, кобальта, меди, часто кальция, с избытком марганца, железа. Такие биогеохимические провинции с характерными для них эндемиями (зоб, акобальтоз, ломкость костей у животных и т. п.) не встречаются в соседней черноземной зоне. Интерзональные (азональные) биогеохимические провинции, особенно с избытком химических элементов, возникают в районах рудных месторождений, солевых отложений, вулканов, в зонах техногенного загрязнения. Например, борные биогеохимические провинции и эндеми (среди флоры и фауны) обнаружены в бессточ-

ных областях; флюороз человека и животных – в окрестностях недавно действовавших вулканов, месторождений флюорита и фторapatита, в районах с высоким содержанием фтора в питьевых водах; карies зубов – в регионах с недостатком фтора в питьевых водах.

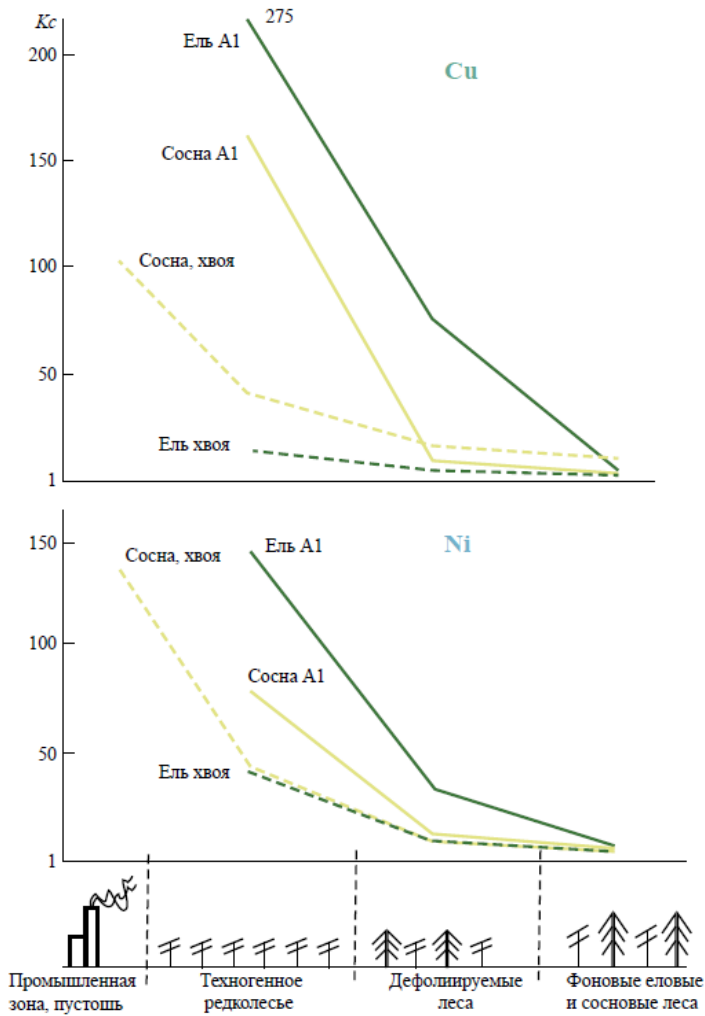


Рис. 6. Распределение Cu и Ni в ели и сосне вокруг комбината «Североникель», Кольский полуостров. Коэффициенты аномальности K_c рассчитаны по [59]

Классификация биогеохимических провинций [43]

Основной признак	Тип провинции
1. Время генезиса	1.1. Современные 1.2. Палеобиогеохимические
2. Территориальный	2.1. Региональные 2.2. Субрегиональные 2.3. Азональные (интерзональные)
3. Фактор воздействия: 3.1. Генезис 3.2. Концентрационный признак 3.3. По степени локализации и трансформации	3.1.1. Природные 3.1.2. Природно-техногенные 3.1.3. Техногенные (антропогенные) 3.2.1. Позитивные 3.2.2. Негативные 3.3.1. Первичные 3.3.2. Вторичные (аккумулятивные)
4. По особенностям структуры и свойств геохимической среды	4.1. Геохимические 4.2. Ландшафтно-геохимические 4.3. Собственно биогеохимические
5. По ответным реакциям отдельных организмов	5.1. С выраженными реакциями микроорганизмов 5.2. Реакции растений 5.3. Реакции животных 5.4. Реакции человека
6. Тип биологических реакций	6.1. С различной степенью аккумулярования химических элементов и соединений 6.2. С выраженной биогеохимической дифференциацией флоры и фауны 6.3. С биогеохимическими и умеренными морфологическими изменениями 6.4. С проявлением биогеохимических эндемий и микроэлементозов
7. Степень экологического состояния	7.1. С относительно благополучной экологической ситуацией 7.2. Зоны риска 7.3. Зоны кризиса 7.4. Зоны экологического бедствия

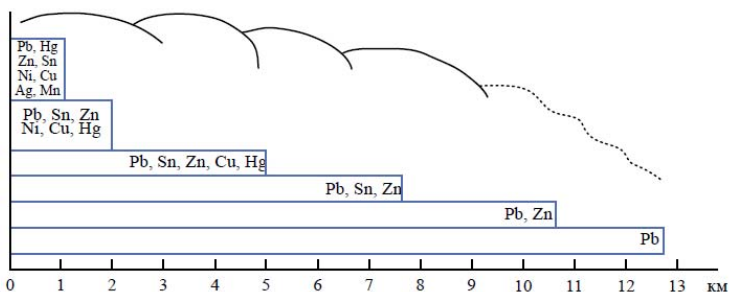


Рис. 7. Зональность выпадения химических элементов в техногенном воздушном потоке рассеяния [87]

5. Выводы

Масштабы техногенного воздействия на наземные и водные системы в горнорудных районах настолько велики, что всецело определяют их геохимические особенности. В потенциале любое рудное месторождение представляет собой комплексный источник загрязнения окружающей среды, что связано с присутствием повышенных концентраций широкой ассоциации химических элементов в добываемых и перерабатываемых рудах, а также в отходах производства, составляющих до 98% извлекаемой горной массы. Основными источниками загрязняющих веществ являются руды и первичные ореолы, причем пространственные размеры последних и количество (масса) заключенных в них химических элементов в большинстве случаев превышают соответствующие параметры рудных тел, вокруг которых они образуются. В освоенных районах главным фактором преобразования природной среды являются техногенные процессы, проявляющиеся на стадиях поисков и разведки и интенсифицирующиеся при эксплуатации месторождений. Для техногенных миграционных цепей, где распространение поллютантов происходит при образовании отходов, стоков и выбросов, интенсивность загрязнения (степень экологической опасности) во многом определяется типом месторождения, его минералого-геохимическими особенностями, связана с принятой системой добычи, обогащения и переработки минерального сырья и во многом обусловлена объемами и составом извлекаемых горных пород и руд, качеством очистки сточных вод, промышленных выбросов, способами обработки и особенностями хранения отходов, а также зависит от характеристик местных ландшафтов. На ранних стадиях освоения месторождения состав химического загрязнения в целом соответствует геохимической специализации территории. По мере увеличения степени освоения месторождения интенсивность техногенного воздействия увеличивается, а качественный состав загрязнения может резко меняться (нередко за счет наиболее интенсивного концентрирования попутных компонентов руд). Наиболее экологически опасными являются промышленно-генетические типы месторождений, разработка которых приводит к резкому

увеличению мощности зоны гипергенеза и изменению условий миграции поллютантов. В образовании техногенных геохимических аномалий важную роль играют пылевые выбросы в атмосферу, отвалы горных пород и хвостохранилища, определяющие состав поверхностного (талого и дождевого) стока с территории горнорудных районов.

Особенно существенное влияние горнодобывающая промышленность оказывает на миграцию химических элементов в поверхностных водотоках, которая проявляется в формировании интенсивных и протяженных геохимических аномалий в донных отложениях. В существенной мере это определяет поступлением в водотоки осадочного материала, обладающего специфическим химическим составом и обогащенного химическими элементами. Техногенное воздействие приводит к изменению природного (характерного для данного района) соотношения основных форм миграции металлов – взвешенной и растворенной, прежде всего, за счет увеличения доли взвешенных форм. При удалении от источников воздействия наряду с общим снижением концентрации металлов подобные нарушения сглаживаются, главным образом, за счет более интенсивного выведения из потока взвешенного материала. Протяженность потоков рассеяния во взвешенной форме для горнодобывающих и металлургических предприятий составляет 20–30 км, в растворенных формах намного меньше. Именно за счет высоких концентраций и значительных масс взвешенных форм элементов и происходит образования интенсивных и протяженных геохимических аномалий в донных отложениях рек. В зонах влияния геологоразведочных работ и добывающих предприятий, где качественный состав техногенных источников в принципе адекватен рудогенным, соотношение между химическими элементами в рядах концентрации в донных отложениях меняется, а общий уровень их накопления в техногенных потоках значительно выше, нежели в рудогенных. В горнорудных и горнопромышленных районах в донных отложениях водотоков фиксируются интенсивные, комплексные по составу, устойчивые и протяженные по руслу техногенные геохимические аномалии (техногенные потоки рассеяния). Степень концентрирования химических элементов значительно превышает таковую в природных (рудогенных) аномалиях. Количественные соотношения между химическими элементами в техногенных геохимических ассоциациях совершенно иные, чем в природных (рудогенных). Очень часто степень концентрирования сопутствующих химических элементов (элементов-примесей) в донных отложениях техногенно загрязненных рек выше, нежели главных компонентов добываемых и перерабатываемых руд. В формировании техногенных геохимических аномалий существенную роль играют пылевые выбросы в атмосферу, отвалы горных пород и хвостохранилища, определяющие состав поверхностного (талого и дождевого) стока с территории горнорудных районов. Уровни содержания многих химических элементов в шламах, взвеси сточных вод, донных отложениях рек интенсивно освоенных горнорудных районов не уступают их концентрациям в рудах. Если в фоновом русловом аллювии доминируют устойчивые, прочносвязанные формы химических элементов, то в условиях загрязнения в донных отложениях рек заметно возрастает доля их более подвижных, геохимически активных форм. Масштабы загрязнения существенно увеличиваются в следующем ряду источников воздействия: «геологоразведочные работы – добыча руд – их обогащение – переработка руд». Протяженность техногенных потоков рассеяния в донных отложениях рек горнорудных районов достигает десятком километров. Элементный состав техногенных геохимических ассоциаций и значения

суммарного показателя Z_c свидетельствуют о чрезвычайно высоком уровне техногенного загрязнения рек изученных горнопромышленных районов.

В горнорудных районах техногенное воздействие приводит к изменению природного соотношения основных форм миграции металлов – взвешенной и растворенной, главным образом, за счет увеличения доли взвешенных форм. Именно за счет высоких концентраций и значительных масс взвешенных форм элементов и происходит образования интенсивных и протяженных геохимических аномалий в донных отложениях рек. В зонах влияния геологоразведочных работ и добывающих предприятий, где качественный состав техногенных источников в принципе адекватен рудогенным, соотношение между химическими элементами в рядах концентрации в донных отложениях меняется, а общий уровень их накопления в техногенных потоках значительно выше, нежели в рудогенных. В горнорудных и горнопромышленных районах в донных отложениях водотоков фиксируются интенсивные, комплексные по составу, устойчивые и протяженные по руслу техногенные геохимические аномалии (техногенные потоки рассеяния). Степень концентрирования химических элементов значительно превышает таковую в природных (рудогенных) аномалиях. Количественные соотношения между химическими элементами в техногенных геохимических ассоциациях совершенно иные, чем в природных (рудогенных). Очень часто степень концентрирования сопутствующих химических элементов (элементов-примесей) в донных отложениях техногенно загрязненных рек выше, нежели главных компонентов добываемых и перерабатываемых руд. Нередко уровни содержания многих химических элементов в шламах, взвеси сточных вод, донных отложениях рек интенсивно освоенных горнорудных районов не уступают их концентрациям в рудах. Если в фоновом русловом аллювии доминируют устойчивые, прочносвязанные формы химических элементов, то в условиях загрязнения в донных отложениях рек заметно возрастает доля их более подвижных, геохимически активных форм. Масштабы загрязнения существенно увеличиваются в следующем ряду источников воздействия: «геологоразведочные работы – добыча руд – их обогащение – переработка руд». Протяженность техногенных потоков рассеяния в донных отложениях рек горнорудных районов достигает десятком километров. Элементный состав техногенных геохимических ассоциаций и значения суммарного показателя Z_c свидетельствуют о чрезвычайно высоком уровне техногенного загрязнения рек изученных горнопромышленных районов.

В горнорудных районах можно выделить несколько ландшафтно-функциональных зон техногенной геохимической трансформации природных комплексов. Первая зона – это шахтно-карьерно-отвалы ландшафты с практической полной деградацией почвенно-растительного покрова с высокими концентрациями широкой группы химических элементов в различных компонентах окружающей среды и резким изменением гидрогеологических условия и гидрогеохимического режима подземных вод. Вторая зона – ландшафты на месте и в сфере непосредственного влияния горнопромышленных комбинатов и обогатительных фабрик, претерпевшие полную или значительную перестройку первоначальной структуры за счет отчуждения площадей под предприятия и загрязнения всех компонентов окружающей среды токсичными выбросами, отходами и стоками. При обогащении руд расширяется ассоциация и увеличиваются концентрации многих поллютантов. Интенсивность аномалий металлов, как правило, убывает в ряду выбросы – атмосферные выпадения (снег) – почвы, но может сущест-

венно возрастать в донных отложениях и подземных водах. Площадь и конфигурация техногенных аномалий зависят от характера и способа поступления поллютантов в атмосферу (мощность взрывов в карьерах, высота фабричных труб), метеорологической ситуации (направление и скорость ветра, частота инверсий), геоморфологических условий (равнины, горы). Третья зона достаточно сильного загрязнения воздуха, почв, снега и растений в равнинных районах захватывает расположенные вблизи месторождений и комбинатов селитебные и пригородные ландшафты в радиусе 3–5 км. Ассоциация поллютантов сокращается, их концентрации, как правило, на порядок меньше, чем в первых двух зонах. В горных ландшафтах зоны загрязнения интерферируют поперек долины и не выходят на водоразделы. Велико значение экспозиции склонов. В продольном профиле долин загрязнение прослеживается вниз по течению в водах (взвесь) и донных отложениях на расстоянии 10–15 км. Четвертая зона умеренного площадного загрязнения имеет нестабильные очертания и располагается в радиусе от 3–5 до 10–20 км. Особенно критическая экологическая ситуация возникает при разработке крупных рудных месторождений в горных долинах, когда перемещение токсичных отходов по долине приводит к формированию значительных по площади и интенсивности долинных геохимических аномалий вблизи горнорудных городов и поселков. Фоновые ландшафты обычно расположены не ближе 15–20 км и даже более от источников рудных выбросов и стоков. Особенно интенсивные техногенные аномалии во всех компонентах окружающей среды образуются вокруг заводов по выплавке цветных и редких металлов.

Формирующиеся в горнорудных районах зоны техногенного загрязнения отличаются высокой устойчивостью; их негативное воздействие сказывается многие десятки лет после прекращения функционирования предприятий. Активная горнодобывающая деятельность способна оказывать влияние на очень значительные территории, формируя региональные зоны техногенного загрязнения (техногенные аномальные геохимические поля), которые могут накладываться на так называемые биогеохимические провинции, в настоящее время рассматриваемые как специфические (атипичные) экосистемы на континентах.

Литература

1. *Абдрахманов Р.Ф., Ахметов Р.М.* Гидрогеохимия горнорудных районов // Геохимия, 2016, № 9, с. 829–840.
2. *Авдоин В.Н.* Техногенное окисление сульфидов Красногвардейского месторождения на Урале // Материалы по минералогии месторождений Урала. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984, с. 63–69.
3. *Авдоин В.В., Бойцов В.Е., Григорьев В.М. и др.* Месторождения металлических полезных ископаемых. – М.: Академический проект, 2005. – 720 с.
4. *Авессаломова П.А.* Геохимическая оценка состояния среды города в сфере воздействия горно-металлургического производства // Ученые записки Тартуского ун-та, 1985, № 704, с. 50–55.
5. Антропогенные изменения земельных ресурсов зарубежных стран. – М.: ВИНТИ, 1981. – 180 с.
6. *Аржанова В.С., Елматьевский П.В.* Геохимия ландшафтов и техногенез. – М.: Наука, 1990. – 198 с.
7. *Аржанова В.С., Елматьевский П.В.* Горнопромышленный техногенез как фактор трансформации гидрохимии природных вод // Эколого-геохими-

ческие исследования в районах интенсивного техногенного воздействия. – М.: ИМГРЭ, 1990, с. 21–32.

8. *Баранов Э.Н.* Эндогенные геохимические ореолы колчеданных месторождений. – М.: Наука, 1987. – 296 с.

9. *Бардамова П.В., Смирнова О.К.* Использование природных сорбентов для очистки рудничных вод Джидинского месторождения // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералогическое образование: Труды III Всерос. симп. с междунар. участием и IX Всерос. чтений пам. акад. А.Е. Ферсмана 29 ноября – 2 декабря 2010 г. Чита, Россия. – Чита: Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 2010, с. 136–139.

10. *Барсуков В.А., Григорян С.В., Овчинников А.Н.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. – М.: Наука, 1981. – 317 с.

11. *Бачурин Б.А., Одицова Т.А.* Отходы горно-обогатительного производства как источники эмиссии органических поллютантов // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2009, № 7, с. 374–380.

12. *Бачурин Б.А., Одицова Т.А.* Методические особенности контроля органического загрязнения гидросферы (на примере горнопромышленных территорий) // Вестник ТГУ, 2014, т. 19, вып. 5, с. 1646–1649.

13. *Боброва Л.В., Кондрашова О.В., Федорчук Н.В.* Экономика геологоразведочных работ на ртуть, сурьму и висмут. – М.: Недра, 1990. – 156 с.

14. *Борисенко С.Г.* Технология подземной разработки рудных месторождений. – Киев: Вища шк., 1987 – 262 с.

15. *Бортникова С.Б., Айрияц А.А., Лазарева Е.В.* Геохимия и минералогия техногенных месторождений Салаирского ГОКа // IV Объединенный Междунар. симп. по проблемам прикладной геохимии, посв. памяти акад. Л.В. Таусона. Тезисы. Т. 2. – Иркутск, 1994, с. 31–32.

16. *Буриков Е.В., Сечевича А.М.* Ртуть в медно-колчеданных месторождениях // Разведка и охрана недр, 1976, № 9, с. 7–9.

17. *Бушев А.Г., Гаврилов А.П., Поленов Ю.А., Черкашина Н.А.* Токсичные органические соединения в пегматитовом сырье // Разведка и охрана недр, 1994, № 2, с. 35–37.

18. *Бушев А.Г., Кузьмин В.П., Пеньков В.Ф.* Органические токсиканты в минералах пегматитов и их воздействие на окружающую среду // Минералогические исследования в решении экологических проблем. – М.: ИГЕМ РАН, 1998, с. 43–49.

19. *Бушев А.Г., Машковцев Г.А., Хитаров Д.Н. и др.* Причины токсикоза на пегматитовых и кварцево-жильных месторождениях и оценка токсичности пород // Геология месторождений редких и редкоземельных металлов. – М.: ВИМС, 1991, вып. 128, с. 95–101.

20. *Вернадский В.И.* Геохимия марганца в связи с учением о полезных ископаемых // Труды Конференции по генезису руд железа, марганца и алюминия. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1937, с. 229–246.

21. *Виноградов В.П.* О миграции молибдена в зоне гипергенеза // Геохимия, 1957, № 2, с. 120–126.

22. *Гапонцев Г.П., Кутляхметов А.Н.* Вопросы промышленного и бытового загрязнения ртутью городов Урала // IV Объединенный Междунар. симп. по проблемам прикладной геохимии, посв. памяти акад. Л.В. Таусона, 7–10 сентября 1994 г., Иркутск, Россия. Тезисы. – Иркутск, 1994, с. 38–39.

23. *Геология и окружающая среда: Международное руководство в трех томах: Т. 2: Добыча полезных ископаемых и геологическая среда.* – М.: Внешторгиздат, 1990. – 260 с.

24. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 192 с.

25. Герцева Н.С. Обработка цианидсодержащих стоков. // Экспресс-информация. Охрана окружающей среды на предприятиях цветной металлургии. Вып. 7. – М.: ЦИИЭИ, 1983. – 7 с.

26. Голева Г.А. Гидрогеохимия рудных элементов. – М.: Недра, 1977. – 217 с.

27. Галик В.И. Специальные способы разработки месторождений. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 132 с.

28. Головин А.А., Гуляева Н.Г., Кальева О.П., Колотов Б.А. Выявление и оценка загрязнения окружающей среды токсичными химическими элементами на основе многоцелевого геохимического картирования // Разведка и охрана недр, 2012, № 7, с. 57–61.

29. Горшков С.П. Концептуальные основы геоэкологии. – Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. – 448 с.

30. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году». – М., 2016. – 341 с.

31. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Оренбургской области в 2014 году. – Оренбург, 2015. – 263 с.

32. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016. – М.: Минприроды России; НИИ-Природа. – 2017. – 760 с.

33. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2015 году. – Екатеринбург, 2016. – 310 с.

34. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Хабаровского края в 2015 году. – Хабаровск, 2016. – 255 с.

35. Грабовников В.А., Рубейкин В.З., Самсонов В.Г., Самсонова А.М. Формирование и строение ореолов рассеяния вещества в подземных водах. – М.: Недра, 1977. – 136 с.

36. Григорян С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведки рудных месторождений. – М.: Недра, 1987. – 408 с.

37. Григорян С.В., Морозов В.И. Вторичные литохимические ореолы при поисках скрытого орудуенения. – М.: Наука, 1985. – 238 с.

38. Доклад об экологической ситуации в Камчатском крае в 2016 году. – Петропавловск-Камчатский, 2017. – 374 с.

39. Доклад об экологической ситуации на территории Республики Башкортостан в 2015 году. – Уфа, 2015. – 167 с.

40. Елпатьевский П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. – М.: Наука, 1993. – 253 с.

41. Елпатьевский П.В., Аржанова В.С. Воздействие горнорудных предприятий на гидрохимию природных вод в Приморье // Гидрогеологические аспекты в экологии: Сб. докл. 1-й Всес. науч.-техн. конф. «Геоэкология: проблемы и решения», Москва, апрель, 1990. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1991, с. 146–154.

42. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. – Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1991. – 256 с.

43. Ермаков В.В. Биогеохимические провинции: концепция, классификация и экологическая оценка // Основные направления геохимии. – М.: Наука, 1995, с. 183–196.

44. Зверева В.П., Савченко А.В., Костина А.М. Оценка и прогноз воздействия сухих хвостов Комсомольского района на гидросферу методом физико-химического моделирования // Минералогия и геохимия ландшафта гор-

нородных территорий. Современное минералообразование: Труды III Всероссий. сим. с междунар. участием и IX Всерос. чтений пам. акад. А.Е. Ферсмана 29 ноября – 2 декабря 2010 г. Чита, Россия. – Чита: Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 2010, с. 146–150.

45. *Планинов Р.Г., Казымов К.П., Меньшикова Е.А., Осовецкий Б.М.* Исследование вещественного состава пород Учалинского медноколчеданного месторождения с целью оценки взрывоопасности сульфидной пыли // Колчеданные месторождения – геология, поиски, добыча и переработка руд. Мат-лы Всерос. научн. конф. (V Чтения памяти С.Н. Иванова). – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2013, с. 65–68.

46. *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, 2016, № 3 (56), с. 95–101.

47. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 23-2017. Добыча и обогащение руд цветных металлов. М.: Бюро НДТ, 2017. – I–IX + 327 с.

48. *Камбаров А.Н.* Формирование хвостохранилищ обогатительных фабрик // Научный альманах, 2015, № 8 (10), с. 1201–1203.

49. *Касимов Н.С.* Экогеохимия ландшафтов. – И.: ИП Филимонова М.В., 2013. – 208 с.

50. *Качур А.Н., Скирина И.Ф. и др.* Накопление тяжелых металлов в картофеле и лишайниках в условиях техногенных аномалий // 9-я Всес. конф. по проблемам микроэлементов в биологии. – Кипшинев: Шттинца, 1981, с. 28–29.

51. *Ковалевский А.А.* Особенности формирования рудных биогеохимических ореолов. – Новосибирск, 1975. – 115 с.

52. *Колотов Б.А.* Гидрогеохимия рудных месторождений. – М.: Недра, 1992. – 234 с.

53. *Колотов Б.А.* Прогноз экологической опасности при разработке рудных месторождений // Экология и экономика природопользования. Тез. докл. науч.-практ. конф. – М., 1995, с. 67–68.

54. *Колотов Б.А., Крайнов С.Р., Рубейкин В.З. и др.* Основы гидрогеохимических поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 199 с.

55. *Колотов Б.А., Янин Е.П., Калугин Д.Е.* Проблемы геоэкологии рудных районов в зонах взаимодействия литосферы и гидросферы // CD-ROM: Всерос. съезд геологов и науч.-практ. Геологическая конференция «Геологическая служба и минерально-сырьевая база России на пороге XXI века. Тез. докл. Кн. 4. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2000, с. 330–331.

56. *Криночкин А.А., Тюленева В.М., Голева Р.В.* Признаки техногенного загрязнения потоков рассеяния Рудного Алтая // Геоэкологические исследования и охрана недр. – М.: Геоинформмарк, 1994, вып. 1, с. 39–54.

57. *Лешан П.Ю., Ахметов Р.М.* Микроэлементы в подземных водах нефтесодобывающих и горнорудных предприятия // Проблемы недропользования: Мат-лы V Всерос. молодежной научн.-практ. конф. (с участием иностранных ученых) 8–11 февраля 2011 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011, с. 317–324.

58. *Ломоносов Г.Г.* Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений. – М.: Горная книга, 2013. – 522 с.

59. *Лукина Н.В., Полянская А.М., Орлова М.А.* Питательный режим почв северотаежных лесов. – М.: Наука, 2008. – 342 с.

60. *Ляхович В.В.* Связь оруденения с магматизмом (Тырныауз). М.: Недра, 1976. – 336 с.
61. *Мелентьев Г.Б.* Инновационный потенциал техногенных ресурсов России и роль технологической геохимии в их изучении и оценке перспектив комплексного промышленного использования // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Сб. статей IX семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск: КНЦ РАН, 2015, с. 8–30.
62. *Месяц С.П., Остапенко С.П.* Оценка ресурсных возможностей территории Кольского горнопромышленного комплекса для восстановления почвенно-экологических функций нарушенных земель // Экология антропогена и современности: природа и человек: Сборник научн. докладов, представленных на междунар. конф. Волгоград-Астрахань, 24–27 сентября 2004 г. – СПб.: Гуманистика, 2004, с. 409-417.
63. *Месяц С.П., Остапенко С.П., Зорин А.В.* Методический подход к оценке аэрозольного техногенного загрязнения по данным спутниковых наблюдений на примере горнопромышленного комплекса Мурманской области // Горная промышленность, 2016, № 6, с. 69–73.
64. Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по вторичным ореолам рассеяния. – М.: ИМГРЭ, 1993. – 191 с.
65. Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по потокам рассеяния. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 164 с.
66. Минеральные ресурсы мира на начало 1997 года. – М.: ГНПП «Аэрогеология», 1998. – 738 с.
67. *Мосинев В.Н., Грязнов М.В.* Горные работы и окружающая среда. – М.: Недра, 1978. – 192 с.
68. *Мустафин С.К., Минигазимов Н.С., Зайнуллин Х.Н. и др.* Проблемы ртутной безопасности Южного Урала // Экологические проблемы промышленных зон Урала. Т. 1. – Магнитогорск: МГМА, 1998, с. 148–154.
69. Назаров А.Г. Геохимия высокогорных ландшафтов. – М.: Наука, 1974. – 198 с.
70. *Овчинников А.Н.* Прикладная геохимия. – М.: Недра, 1990. – 247 с.
71. *Овсянникова Т.М.* Радиоактивность руд редких металлов и продуктов их переработки: нормирование, уровни и методы определения // Разведка и охрана недр, 2015, № 3, с. 56–60.
72. *Опекунов А.Ю.* Аквальный техноседиментогенез. – СПб.: Наука, 2005. – 278 с.
73. *Перельман А.П.* Геохимия. – М.: Высшая школа, 1989. – 528 с.
74. *Перельман А.П., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. – М.: Астрейя-2000, 1999. – 768 с.
75. *Пиковский Ю.П.* Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 208 с.
76. *Поливанов В.С., Иванова А.П., Вавилова Г.В.* Особенности геохимического функционирования геосистем в связи с техногенезом // Вопросы географии, 1977, сб. 106, с. 97–104.
77. *Поликарповкин В.В.* Вторичные ореолы и потоки рассеяния. – Новосибирск, 1976. – 407 с.
78. *Постникова В.П., Яхонтова Л.К.* Минералогия зоны гипергенеза оловорудных месторождений Комсомольского района. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. – 124 с.

79. Проблемы геолого-экономической оптимизации сети наблюдений при геохимических работах. – М.: ИМГРЭ, 1994. – 148 с.

80. *Пхалагова Д.М.* Формирование химического состава высокогорных рек Центрального Кавказа. – Орджоникидзе: Северо-Осетинское кн. изд-во, 1957. – 115 с.

81. *Пэк А.В.* Геологическое строение рудного поля и месторождения Тырныауз. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 168 с.

82. *Родзянко Н.Г., Нефедов Н.К., Свириденко А.К.* Редкометалльные скарны Тырныауза. – М.: Недра, 1973. – 215 с.

83. *Сает Ю.Е.* Вторичные геохимические ореолы при поисках рудных месторождений. – М.: Наука, 1982. – 168 с.

84. *Сает Ю.Е.* Антропогенные геохимические аномалии (особенности, методика изучения и экологическое значение): Автореф. дис. ... док. геол.-мин. наук. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 53 с.

85. *Сает Ю.Е.* Методические основы эколого-геохимических исследований при геологоразведочных работах // Разведка и охрана недр, 1986, № 5, с. 35–39.

86. *Сает Ю.Е., Онищенко Т.А., Янин Е.П.* Методические рекомендации по геохимическим исследованиям для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых горнодобывающих предприятий. – М.: ИМГРЭ, 1986. – 99 с.

87. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

88. *Сает Ю.Е., Янин Е.П., Алексинская А.Н.* Геохимические критерии различия рудных и антропогенных потоков рассеяния в поверхностных водотоках // Гидрогеохимические методы поисков рудных месторождений и прогноза землетрясений (Мат-лы Второго междунар. симп. «Методы прикладной геохимии»). – Новосибирск: Наука, 1983, с. 87–95.

89. *Сауков А.А.* Геохимия. – М.: Наука, 1975. – 480 с.

90. *Сафронов Н.П.* Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. – Л.: Недра, 1971. – 216 с.

91. *Сахарова М.С., Китаенко А.Э., Кривицкая Н.Н. и др.* Формы нахождения и особенности накопления токсичных элементов в золото-серебряных рудах Северо-Востока России // Минералогические исследования в решении экологических проблем. – Москва: ИГЕМ РАН, 1998, с. 61–72.

92. *Семенов Ю.Н.* Геохимические методы при изучении техногенных аномалий в районах хвостохранилищ свинцово-цинкового комбината (на примере Горной Осетии) // IV-й Объединенный Междунар. симп. по проблемам прикладной геохимии, посв. памяти акад. Л.В. Таусона. Тезисы. Т. 2. – Иркутск, 1994, с. 91–92.

93. *Семячков А.П., Парфенова А.П., Кучин В.В.* К вопросу об экологической безопасности при использовании способа кучного выщелачивания меди на Волковском руднике // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: Труды IV Междунар. научн.-практ. конф. 7 апреля 2016. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2016, с. 356–363.

94. *Сидорчук А.Ю.* Сток техногенных наносов в бассейне р. Омолоя (Северная Якутия) и разрушение речных экосистем // 3-я Междунар. конф. «Освоение Севера и проблемы рекультивации». Тез. докл. С.-Петербург, 28–31 Мая 1996. – Сыктывкар, 1996, с. 175–176.

95. *Сорокина Е.П., Янин Е.П., Авесаломова П.А. и др.* Разработка геохимической основы методики изучения загрязнения окружающей среды химиче-

скими элементами в условиях Европейской части СССР. Отчет по теме XI Д.1.2/002(4) III/233. В 3 т. Т. 3. – М.: ИМГРЭ, 1983, с. 1–83.

96. *Табаксблат А.С.* Кадмий в рудничных водосбросах медноколчеданных месторождений // Изв. вузов. Геол. и разведка, 1988, № 2, с. 79–83.

97. *Табаксблат А.С.* О специфике загрязнения окружающей среды в горно-рудных районах // Рациональное использование недр и охрана окружающей среды. – СПб.: Горный институт, 1992, с. 93–97.

98. *Табаксблат А.С., Рапопорт А.М.* Эколого-экономическая оценка сброса рудничных вод в окружающую среду горнорудного района // Рациональное использование недр и охрана окружающей среды. – Л.: ЛГИ, 1990, с. 113–117.

99. *Табаксблат А.С., Умаров М.У.* Содержание металлов в рудничных водосбросах как источника преобразования окружающей среды горнорудных районов // Водные ресурсы, 1991, № 2, с. 158–167.

100. *Тайсаев Т.Т.* Техногенные ландшафты и потоки рассеяния рудно-россыпных месторождений Забайкалья // IV Объединенный Междунар. симп. по пробл. прикл. геохимии, посв. памяти акад. А.В.Тausона. Тезисы. Т. 2. – Иркутск, 1994, с. 99–100.

101. *Токарев П.В., Тимошкин Г.А.* Эколого-геохимическая оценка влияния геологоразведочных работ на окружающую среду. Отчет по производственным работам ПР-128 за 1982–1985 гг. – Н. Бираганг: ЦОМГЭ ИМГРЭ, 1985. – 290 с.

102. *Толмаков П.П., Манкевич В.В.* Открытая разработка угольных и рудных месторождений. – М: Издательство Московского государственного горного университета, 1995. – 611 с.

103. Требования к геохимическим работам при ГСР-50 с общими поисками. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 128 с.

104. *Трофимович Е.М., Гурвич С.М.* Охрана водных объектов при добыче и обогащении руд и углей. – М.: Недра, 1985. – 192 с.

105. *Тюленева В.М., Сидоренко Г.А., Кривоконова Г.К. и др.* Минеральные формы токсикантов – важный критерий в выявлении признаков техногенного загрязнения потоков рассеяния // Минералогические исследования в решении экологических проблем: Тр. конф. по экоминералогии, 29–30 января 1996 г. – М.: ИГЕМ РАН, 1998, с. 73–88.

106. *Тютюнова Ф.П., Пантелеев П.Я., Пантелеева Т.П. и др.* Прогноз качества подземных вод в связи с их охраной от загрязнения. – М.: Наука, 1978. – 208 с.

107. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности. – М.: Стройиздат, 1978. – 590 с.

108. *Федорчук В.П.* Геология ртути. – М.: Недра, 1983. – 270 с.

109. *Федорчук В.П., Мишур Э.Ф.* Геологический справочник по ртути, сурьме, висмуту. – М.: Недра, 1990. – 215 с.

110. *Фекличев В.Г.* Принципы типизации горнорудных и сопутствующих производств крупного региона в целях эколого-геохимического картирования (на примере Кольского полуострова) // Геоэкологические исследования и охрана недр, вып. 1. – М.: Геоинформмарк, 1994, с. 24–33.

111. *Филиппова А.А.* Потоки рассеяния в речной мути и использование их при поисковых работах // Ежегодник-1973 Ин-та геохимии СО АН СССР. – Новосибирск: Наука, 1974, с. 267–169.

112. *Хаустов В.В.* Об очистке жидких отходов ГОКов природными сорбентами (на примере одного из скарных месторождений Северного Кав-

каза) // Физические процессы горного производства: Тез. докл. 10 Всес. науч. конф. вузов СССР с участием НИИ. – М.: МГИ, 1991, с. 198–200.

113. Хаустов В.В., Дубяга А.П. О влиянии разработки месторождения Тырныауз на водную экосистему реки Баксан (биохимический аспект) // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. Сер. Техника и технологии, 2012, № 2, ч. 2, с. 228–235.

114. Чечель Л.П. Равновесия в системе вода-порода в водных потоках рассеяния молибденового месторождения Шахтама (Восточное Забайкалье) // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: Труды III Всерос. симп. с междунар. участием и IX Всерос. чтений пам. акад. А.Е. Ферсмана 29 ноября – 2 декабря 2010 г. Чита, Россия. – Чита: Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 2010, с. 116–120.

115. Чечель Л.П. Геохимические барьеры как фактор самоочищения дренажных вод отработанных вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: Труды IV Всероссийского симпозиума и X Всероссийских чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана 5–8 ноября 2012 г. Чита, Россия. – Чита: Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 2012, с. 111–115.

116. Чуmacherко А.М., Ананьев А.П., Голубкова П.Ф., Фомин П.А. О радиоактивной загрязненности атмосферы рудников по добыче руд цветных и редких металлов // Цветная металлургия, 1992, № 2, с. 66–70.

117. Шестеркин В.П. Химический состав подземных и поверхностных вод золото-серебряных месторождений Прихотья // Эколого-биогеохимические исследования на Дальнем Востоке. – Владивосток: Дальнаука, 1996, с. 105–111.

118. Шафигуллина Г.Т., Удачин В.Н., Филиппова К.А. Геохимия тяжелых металлов в техногенных почвах Учалинской и Сибайской геотехнических систем // Проблемы недропользования: Мат-лы V Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (с участием иностранных ученых) 8–11 февраля 2011 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011, с. 372–379.

119. Юргенсон Г.А., Филленко Р.А., Смирнова О.К. и др. Минералогическо-геохимические особенности техноземов хвостохранилища Нерчинского полиметаллического комбината и его влияние на экологическое состояние окружающей среды // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: Труды IV Всерос. симп. и X Всерос. чтений пам. акад. А.Е. Ферсмана 5–8 ноября 2012 г. Чита, Россия. – Чита: Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 2012, с. 41–45.

120. Янин Е.П. Экологическая геохимия горнопромышленных территорий. – М.: Геоинформмарк, 1993. – 50 с.

121. Янин Е.П. Добыча и производство ртути в СНГ как источник загрязнения окружающей среды // Эколого-геохимические проблемы ртути. – М.: ИМГРЭ, 2000, с. 38–59.

122. Янин Е.П. Эмиссия ртути в окружающую среду предприятиями цветной металлургии России // Экологическая экспертиза, 2004, № 5, с. 41–101.

123. Янин Е.П. Источники и особенности загрязнения речных систем в горнорудных районах // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2005, № 1, с. 2–33.

124. Янин Е.П. Биогеохимические провинции // Новая Российская энциклопедия: В 12 т. Том 3 (1). – М.: ООО «Издательство «Энциклопедия»: ИД «ИНФРА-М», 2007, с. 205–206.

125. Янин Е.П. Возможные подходы к оценке техногенного загрязнения при интерпретации геохимических аномалий в горнорудных районах // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2008, № 4, с. 58–87.

126. Янин Е.П. Биогеохимическая провинция // Российская геологическая энциклопедия: В трех томах. Т. 1 (А-И). – М. – СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2010, с. 133–134.

127. Янин Е.П. Экологическая геохимия, техногенез и проблемы недропользования в горнорудных районах // Экономика природопользования, 2010, № 4, с. 55–59.

128. Янин Е.П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). – М.: НП «АРСО», 2018. – 415 с.

129. Янин Е.П. Техногенез, недропользование, экологическая геохимия: последствия, проблемы, приоритеты // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий, 2018, № 12, с. 420–422.

130. Янин Е.П. Оценка влияния геологоразведочных работ на окружающую среду // Экологическая экспертиза, 2019, № 1, с. 2–49.

131. Янин Е.П. Техногенные геохимические аномалии в донных отложениях рек и приемы их выявления и оценки // Экологическая экспертиза, 2019, № 1, с. 50–68.

132. Янин Е.П. Техногенные потоки рассеяния химических элементов в реках горно-рудных ландшафтов // Экологическая экспертиза, 2019, № 1, с. 69–101.

133. Янин Е.П. Вторичные преобразования техногенных речных илов и процессы высвобождения связанных с ними загрязняющих веществ. Обзор // Экологическая экспертиза, 2018, № 4, с. 85–115.

134. Янин Е.П., Кашина Л.П., Тимошкин Г.А., Токарев П.В. Геохимические особенности потоков рассеяния химических элементов в горнодобывающих районах // Геохимия техногенеза, ч. II. – Иркутск: СибГЕОХИ, 1985, с. 108–111.

135. Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Пваницкий О.М. Определение природной региональной не-однородности химического состава поверхностных вод при установлении нормируемых показателей качества воды // Тр. Четвертой Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов», Москва, 15–18 сентября 2015 г. – М.: ИВП РАН, 2015, с. 222–224.

136. Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Пваницкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2016, № 6, с. 3–72.

137. Янин Е.П., Тимошкин Г.А. Техногенные потоки рассеяния химических элементов в зоне влияния предприятий по добыче и обогащению полиметаллических руд // Геохимия ландшафтов (Гез. докл. Всес. сов.). – Новороссийск, 1986, с. 146–148.

138. Янин Е.П., Тимошкин Г.А. Техногенные потоки рассеяния химических элементов в поверхностных водотоках горнопромышленных ландшафтов

пафтов // Биогеохимические методы при изучении окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 1989, с. 37–44.

139. *Annegarn H.J. et al.* Composition and size of dust in a gold mine atmosphere // J. Mine Vent. Soc. S. Afr., 1988, 41, № 1, p. 1–10.

140. Applied Environmental Geochemistry. – Academic press geol. series. – London, 1983. – 342 p.

141. *Chorke C.Y., Cruikshank B.I.* Statistical map analysis of regional stream-sediment data from Australia // J. Geochem. Explor., 1984, 21, № 1–3, p. 405–419.

142. *Duda A.M., Penrose D.L.* Impact of mining activities on water quality in western North Carolina // Water Resour. Bull., 1980, 16, № 6, 1034–1040.

143. *Filipek L.H., Chao T.T., Carpenter R.H.* Factors affecting the partitioning of Cu, Zn and Pb in boulder coatings and stream sediments in the vicinity of polymetallic sulfide deposit // Chem. Geol., 1981, 33, № 1–2, p. 45–64.

144. *Foster P., Hunt D.T., Morris A.W.* Metals in an acid mine stream and estuary // Sci. Total Environ., 1978, 8, № 1, c. 75–86.

145. *Förstner U., Wittmann G.T.W.* Metal pollution in the aquatic environment. – Berlin etc.: Springer-Verlag, 1979. – 486 p.

146. *Jennett J.C., Wixson B.G.* Geochemistry, mining and the Environment // Miner. and Environ., 1983, 5, № 2–3, p. 39–53.

147. *Karlsson S., Allard B., Hakanson K.* Chemical characterization of stream-bed sediments receiving high loadings of acid mine effluents // Chem. Geol., 1988, 67, № 1–2, p. 1–15.

148. *Knighton A.D.* River adjustment to changes in sediment load: the effects of tin mining on the Ringarooma River, Tasmania, 1875–1984 // Earth Surface Process. and Landforms, 1989, 14, № 4, p. 333–359.

149. *Mansikkaniemi H.* Measurement of sediment transport in the Schefferville mining areas, central Quebec-Labrador peninsula // McGill Sub-Arct. Res. Rap., 1980, № 30, p. 65–80.

150. *Morris R.J., McCartney M.J., Lockyer C., Hoborn R.* The particulate load of the Red River, St Ives Bay: Its geochemical composition and the effect of its discharge plume on the behaviour of a resident wild dolphin // Marine Pollution Bulletin, 1985, v. 16, № 3, p. 106–108.

151. *Myhra S.* Some environmental aspects of uranium mining and milling in northern Australia // Search., 1978, 9, № 1, p. 400–406.

152. *Nath R.L.* Mining and the Environment – Aspects and Options. (Part II) // Indian Mining and Eng. J., 1982, 21, № 5, p. 22–26.

153. *Patel C.B., Pandey G.S.* Permeation of toxic metals in surface soil through iron ore slime discharge // J. Inst. Eng. (India). Met. and Mater. Sci. Div., 1989, 69, № 2, p. 42–44.

154. *Procopovich N.P.* Acidic surface deposits in California and Nevada // Calif. Geol., 1981, 34, № 1, p. 7–11.

155. *Smith R.E. et al.* Investigations of the impact of effluent from Ok Tedi copper mine on the fisheries resource in the Fly River // Environ. Monit. and Assessment, 1990, 14, № 2, p. 315–331.