

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.

Введение

В освоенных горнорудных районах существуют два основных типа геохимических аномалий (являющихся, с утилитарной точки зрения, зонами загрязнения): природные (рудогенные) аномалии, обусловленные естественными процессами, и техногенные аномалии, связанные с основными видами производственной деятельности, – геологоразведочными работами, горнорудными (добыча руд), горно-обогачительными (обогащение руд) и (в отдельных случаях) металлургическими (переработка руд) предприятиями. Техногенные геохимические аномалии, с одной стороны, должны учитываться при интерпретации материалов, получаемых при проведении поисково-съёмочных и геологоразведочных работ в старых горнорудных районах. С другой стороны, при выполнении оценок воздействия на окружающую среду горного производства, при проведении экологической экспертизы и при планировании функционального использования горнорудных территорий возникает необходимость разделения («разбраковки») рудогенных и техногенных геохимических аномалий.

Природные геохимические особенности горнорудных территорий

В неосвоенных горнорудных районах основными источниками загрязняющих веществ являются руды и первичные геохимические ореолы. Они характеризуются аномальными концентрациями как главных рудных компонентов, определяющих промышленный тип месторождения, так и широкого комплекса сопутствующих химических элементов [1, 11, 28, 36] (табл. 1-3). Обычно пространственные размеры первичных ореолов и количество (масса) заключённых в них химических элементов значительно превышают параметры рудных тел, вокруг которых они образуются. В результате гипергенных процессов происходит разрушение месторождений, обуславливающее перераспределение вещества руд и первичных ореолов в окружающем пространстве и приводящее к образованию гипергенных (рудогенных) геохимических аномалий (вторичных ореолов и потоков рассеяния).

В наиболее общем случае формирование гипергенных аномалий определяется несколькими основными группами геологических процессов [38]: 1) образованием кор выветривания и зон окисления; 2) образованием современного рельефа и соответствующей серии склоновых отложений автохтонного и субавтохтонного типа; 3) образованием чехла перекрывающих месторождение осадочных отложений аллохтонного типа; 4) образованием современных ландшафтов и преобразованием ранее сформированных отложений (несущих ореолы рассеяния) в соответствии с существующей ландшафтно-геохимической ситуацией. Как правило, практически для любой территории обязательно проявление этих четырех групп процессов, последовательно включающихся в работу по трансформации месторождений. Степень геохимической дифференциации материала первичных ореолов и руд определяет вид формирующихся вторичных ореолов, их интенсивность, пространственное положение, ассо-

циацию свойственных им химических элементов. Первой стадией формирования вторичных ореолов рассеяния является выветривание, обуславливающее формирование кор выветривания, т. е. комплекса горных пород, возникающих в верхней части литосферы в результате преобразования в континентальных условиях магматических, метаморфических и осадочных пород под влиянием различных факторов выветривания. Отличительной чертой кор выветривания является наличие вертикального профиля, в пределах которого степень разложения пород возрастает снизу вверх.

Таблица 1. Перечень устойчивых ассоциаций наиболее распространенных элементов различных руд [28]

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

Таблица 2. Геохимические ассоциации элементов, концентрирующихся в некоторых типах рудных месторождений и сопровождающих их ореолах рассеяния [11]

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-порфиоровые	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
Сурьмяно-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

В разрезе зоны гипергенеза месторождений в рудах и первичных ореолах прослеживается дифференциация химических элементов в зависимости от характера вертикального профиля коры выветривания, типа вмещающих пород и степени концентрирования в них сульфидов [37-39]. В силикатных породах (кремнистый тип коры выветривания) наблюдается резкая дифференциация в поведении химических элементов, многие из которых здесь подвижны и энергично выносятся (Zn, Co, Cu, Cd, Se – почти всегда, Pb, As – часто, но осо-

бенно при обилии пирита); другие элементы (например, Mo, Ag, Ba) иногда накапливаются (с гидроксидами железа). В породах алюмосиликатного состава (глинистый тип коры выветривания) подвижность многих элементов снижается в связи с появлением сорбционного барьера, но достаточно энергично выносятся аниогенные элементы (As, F). 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 (карбонатно-глинистый тип коры выветривания) снижение подвижности элементов проявлено особенно контрастно, причем даже в условиях выветривания относительно богатых руд большинство элементов ведет себя сравнительно инертно.

Таблица 3. Характеристика геолого-геохимических групп рудных месторождений (обобщение данных В.В. Иванова) [38]

Группа	Примеры генетических типов	Типоморфные геохимические признаки по соотношению главных компонентов руд	Ассоциации главных промышленных и наиболее типичных аксессуарных (в скобках) элементов руд
Литофильная	Редкометалльные грейзены и гранитные пегматиты, кварц-касситеритовые и вольфрамитовые м-ния	Преобладание кремния над железом, щелочными землями и щелочами; кислорода на серой	Sn, W, Mo, Be (Rb, Cs, Li, Sc, Ta, Nb)
Литофильно-халькофильная	Касситерит и вольфрамит-сульфидные, золото-сульфидные, молибденит-полиметаллические м-ния	Преобладание кремния над железом, щелочными землями и щелочами; близкий уровень содержания кислорода и серы	Sn, W, Mo, Cu, Pb, Zn, Au, As, (Be, Sc, Ag, Co, Bi, Ge)
Халькофильная	Колчеданно-полиметаллические и полиметаллические золото-сульфидные, сурьмяно-ртутные м-ния	Близкий уровень содержания кремния и железа, щелочных земель и щелочей, кислорода и серы	Pb, Zn, Sb, Ag, As, Cu, Mo, TR, U, Co, W (Sc, Tl, Bi, Ge, Cd)
Сидерофильная	Медно-колчеданные, скарново-магнетитовые, медно-никелевые м-ния	Преобладание серы над кислородом и железа над кремнием; близкий уровень содержания щелочей и щелочных земель	Cu, Ni, Zn, Pb, Co, Ag, Au, As, (Sc, Co, Cd)
Щелочная	Карбонатитовые фенит-уртитовые редкометалльные м-ния	Преобладание кислорода над серой, щелочей над кремнием; близкий уровень содержания кремния и железа	TR, Zr, Nb, Ta, Hf, Ga

В общем случае интенсивность проявления и масштабы развития вторичных ореолов и потоков рассеяния определяются промышленным типом месторождения и минеральным типом полезного ископаемого, коэффициентом рудоносности, характером эрозионного среза рудных полей и месторождений, ландшафтно-геохимическими условиями площадей их локализации [12, 21, 22, 32, 38]. Обычно вторичные ореолы и потоки рассеяния блокируются в сближенные серии, характеризующие аномальные геохимические поля рудных полей, узлов и районов. Основными характеристиками геохимических полей являются их размеры, форма, геолого-структурная приуроченность, уровни содержания, состав и количественные соотношения химических элементов (их положение в геохимических ассоциациях), характер пространственного изменения ассоциаций. Как правило, состав аномальных геохимических полей, фиксируемых горными породами и осадочными образованиями, преимущественно комплексный, но с преобладанием одного или нескольких основных рудообразующих эле-

ментов. Менее контрастные, но большие по размерам аномальные поля образуют химические элементы и соединения так называемого широкого рассеяния (ртуть, галогены, щелочные металлы, битумы).

Площади рудных полей колеблются от единиц кв. км до 20 км^2 , в редких случаях достигают нескольких десятков кв. км [21, 22, 39, 53]. Площади месторождений в среднем на порядок меньше площади рудных полей, а площади рудных тел – на порядок меньше площади месторождений. Размеры аномальных геохимических полей, соответствующие потенциальным рудным полям, в среднем составляют $15\text{-}80 \text{ км}^2$ (варьируясь в пределах $8\text{-}180 \text{ км}^2$). Минимальные площади ($8\text{-}40 \text{ км}^2$) характерны для аномальных геохимических полей грейзеновых, пегматитовых, кварцево-жильных рудных полей месторождений W, Au, Sb, Hg, Sn, а максимальные ($10\text{-}180 \text{ км}^2$) – для колчеданных, медно-порфировых, стратиформных и жильных полиметаллических, медно-никелевых, урановых, сурьмяно-ртутных месторождений. Размеры и морфология вторичных литохимических ореолов, средняя протяженность потоков рассеяния в донных отложениях водотоков, их минимальная и максимальная длина для большинства типов рудных месторождений, как правило, достаточно близки. Различия проявляются в составе и интенсивности относительного концентрирования химических элементов. Обычно содержания рудообразующих элементов и элементов-примесей во вторичных ореолах и потоках рассеяния не более чем в 10-15 раз превышает фоновые значения; лишь в центральных и очень локальных зонах ореолов ($0,0n \text{ км}^2$), непосредственно трассирующих рудные тела, интенсивность их концентрирования может быть выше. Тем не менее в пределах зон развития природных геохимических аномалий в почвах для некоторых химических элементов отмечаются участки с превышением санитарно-гигиенических норм. Значительные территории могут характеризоваться высокими значениями суммарных (аддитивных) показателей накопления химических элементов.

Морфология и особенности распределения ассоциаций химических элементов во вторичных ореолах рассеяния на склонах в существенной мере обуславливаются литогенетическим типом склоновых отложений [37, 38]. Так, геологически высокая скорость перемещения материала по склонам определяет широкое развитие шлейфообразных ореолов, развитых на всю длину склона. Для вторичных ореолов рассеяния в обломочно-осыпных склоновых отложениях, всегда развивающихся в почвах, наблюдаются прямые корреляционные связи между их микроэлементным составом и составом почвообразующих пород. Для вторичных ореолов в дефлюкционных и солифлюкционных склоновых отложениях геохимическая дифференциация элементов-индикаторов может привести к трансформации ассоциаций в разрезе рыхлых образований, что обусловлено значительной интенсивностью гравитационного и гранулометрического разделения минералов в ходе перемещения склоновых отложений. Особенно ярко это проявляется при наличии в рудах и первичных ореолах минералов с разной устойчивостью к выветриванию и различными физико-механическими характеристиками, что обуславливает пространственную дифференциацию связанных с ними химических элементов. В стратифицированных склоновых отложениях рассматриваемого типа механические вторичные ореолы часто бывают погребенными [32].

Рудогенные потоки рассеяния в донных отложениях гидросети обычно характеризуются относительно плавным распределением ведущих элементов ассоциации и (часто) выраженной пространственной (латеральной) зональностью. Для них, как правило, характерно наличие двух участков – головной части потока (на котором поступает рудное вещество) и

шлейфа, где происходит перенос поступившего в поток рудного вещества [32]. Головная часть потока нередко отличается резким (скачкообразным) возрастанием содержаний элементов с незакономерными их колебаниями, что во многом объясняется разной растворимостью мигрирующих элементов и литолого-минералогическими особенностями осадочного материала. Длина этой части зависит от размеров месторождения и положения потока по отношению к долине. При переходе от головной части к шлейфу обычно наблюдается быстрое, а затем постепенное уменьшение содержаний химических элементов. В вертикальном разрезе рудогенные потоки рассеяния характеризуются двумя горизонтами – нижним (образован отложениями более древних русел) и верхним (горизонт пойменных и русловых отложений). Потоки рассеяния современных русел находятся в тесном взаимодействии с потоками рассеяния, развитых в пойменных отложениях [31].

Площади локализации рудных месторождений характеризуются присущими им гидрогеохимическими полями, в структуре которых различают области развития рудных вод (ареалы) и ореольных вод (ореолы) [15, 17]. Рудные воды формируются вблизи рудного тела (пространственно совпадают с источником рассеивающего вещества) и характеризуются, как правило, незакономерным и неупорядоченным по отношению к потоку подземных и поверхностных 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 концентраций элементов (пространство от границы рудных вод до фоновых). Гидрогеохимические поля рудных месторождений, рудные и ореольные воды практически всех известных типов рудных месторождений отличаются концентрациями многих макро- и микрокомпонентов, заметно превышающими фоновые уровни (табл. 4, 5).

Таблица 4. Комплекс элементов, присутствующих в аномальных концентрациях в гидрогеохимических полях некоторых рудных месторождений [15]

Месторождение	Специфические элементы в водах	Полный комплекс элементов в водах
Уран-редкометальное	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-шеелит-вольфрамитовое	Sn-W-Bi	Al-Ti-V-Ga-Zr-Sc-Cu
Касситерит-вольфрамитовое	Sn-W	Al-Ti-V-Ga-Zr-Be-Yb-Zn-Cu
Титаномагнетитовое	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

Среди химических элементов, количественно определяемых в подземных водах рудных месторождений, различают две группы: а) элементы с широким геохимическим диапазоном водной миграции и б) элементы с ограниченным геохимическим диапазоном водной миграции [17]. Элементы первой группы (Be, Y, La, Zn, Ni, B, F, As, Mo) увеличивают свои концентрации в подземных водах на всем протяжении вертикального гидрогеохимического разреза месторождений при значительных вариациях химического состава подземных вод и их Eh-pH состояний. Эти элементы образуют глубокие, объемные и протяженные ореолы как в гумидной, так и аридной зонах. Важно отметить, что элементы первой группы являются интенсивными мигрантами не только в подземных водах рудных месторождений, но и во мно-

гих других геохимических типах подземных и поверхностных вод, поэтому. В связи с этим они образуют не только протяженные водные ореолы на всей длине гидрогеохимического разреза рудных месторождений, но и широкий спектр «безрудных» гидрогеохимических аномалий. Элементы второй группы имеют ограниченные геохимические диапазоны водной миграции (Li, Rb, Cs, Ce, Sn, Fe, Pb, Cu, Ge, Se, Sb, W, Nb). Увеличенные концентрации этих элементов приурочены только к определенным вертикальным зонам гидрогеохимического разреза месторождений при ограниченных вариациях химического состава подземных вод и их Eh состояний. Указанные элементы образуют ограниченные по объему и протяженности водные ореолы в основном в гумидной зоне.

Таблица 5. Наиболее распространенные гидрохимические поисковые ассоциации основных типов рудных месторождений [9]

Тип месторождения	Поисковая ассоциация	Сопутствующие микрокомпоненты
Медно-колчеданные	Cu-Zn-Pb-As-Mo	Co-Ni-Ag-B-F-Se-Ge-U
Полиметаллические	Pb-Zn-Ag-Cu-Mo-Cd-Sb	Sn-Ni-Co-Se-Ba-Sr-B-F-U
Медно-молибденовые	Mo-Cu-Ag	As-Zn-Co
Титаномагнетитовые	Ti-Fe	Ni-Co-Cr
Барито-халькопиритовые	Ba-Sr-Cu	Zn-Pb-As
Медно-никелевые	Ni-Cu-Zn-Co-Ag	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-Sc-Cu-Zn-B-F
Вольфрамо-молибденовые	W-Mo-Zn-Cu	-
Вольфрамо-касситеритовые	W-Sn	F-Nb-TR-Be-Cu-Zn
Сподумено-лепидотовые	Li-Rb-Cs-F-Sn	Nb-Be-Cu-Zn-As-TR
Бериллиево-флюоритовые	Be-F	Li-Rb
Ниобиево-танталовые	Nb-Ta-F-Li-Rb	Be-Sn

Протяженность гидрогеохимических ореолов большинства рудных месторождений относительно невелика и составляет в пределах придолинного ландшафта первые сотни метров, реже 1-2 км, в пределах водораздельных ландшафтов гумидного климата – 0,5-3 км, иногда до 5-8 км; в условиях аридного климата – 0,5-2 км. Протяженность водных потоков рассеяния химических элементов в поверхностных водотоках обычно составляет от первых сотен метров до первых километров, в редких случаях достигает 13-17 км. Наиболее интенсивные геохимические аномалии характерны для гидрогеохимических полей сульфидных месторождений, где в результате выщелачивания руд значения pH рудничных вод могут снижаться до 3-4, что максимально интенсифицирует процессы растворения многих элементов и увеличивает их содержания и миграционную способность в природных водах. Как правило, водные ореолы рассеяния химических элементов имеют зональное строение [9]. Наиболее изучена горизонтальная зональность водных ореолов рассеяния в поверхностных или близких к поверхности водоносных горизонтах, которая в общем виде выражается в том, что наиболее удаленная периферия водного ореола характеризуется совместным нахождением в водах относительно более подвижных элементов (Zn, Mo, As, F, B, I, а также сульфат-ион). Для промежуточной зоны водных ореолов сульфидных залежей характерно наличие аномальных концентраций Cu, Pb, Se, Ge и ряда других элементов. Площадные размеры водных ореолов рассеяния этих элементов обычно существенно меньше, чем у более подвижных элементов внешней зоны. В околорудном пространстве в водных ореолах фиксируются также аномальные уровни Cd, Sb, Bi, Co.

Особенности воздействия на горнорудные районы геологоразведочных работ

Геологоразведочные работы, осуществляемые в пределах площадей локализации рудных месторождений, обуславливают геохимические преобразования природной среды, которые связаны с воздействием основного производства, вспомогательного производства и транспорта [10, 59]. Основное производство характеризуется бурением поисковых и поисково-картировочных скважин, проходкой наземных и подземных горных выработок, рубками леса при прокладке геологических просек и профилей. Объекты основного производства преимущественно полевые, обычно с переменной дислокацией. Вспомогательное производство связано с обслуживанием техники, обработкой и хранением проб и т. п. Его объекты в основном стационарные. С ними часто совмещен жилищно-коммунальный фонд поселков геологоразведчиков. Районы поисково-оценочных работ характеризуются существенным воздействием на окружающую среду транспорта. При поисково-оценочных работах применяется в основном механическое колонковое бурение, особенностью которого является относительно малая глубина бурения (более 95% скважин бурится до глубины 500 м), что позволяет использовать самоходное оборудование, и редкое применение (в небольших объемах) реагентов. Нормативное водопотребление составляет в среднем 1,7 м³/м скважины; площадь земельного участка, занимаемого скважиной, – 0,1-0,4 га. При бурении происходит загрязнение почв, подземных вод и поверхностных водных объектов отводимыми водами и отработанным буровым раствором, который содержит воду, глинопорошок, барит, соль, каустическую соду и другие вещества. Некоторые смазки и реагенты содержат Pb и Cr. Для утилизации вод и растворов обычно создаются отстойники, преимущественно земляные, что не исключает их прорывы. Очень часто воды и буровой раствор сбрасываются в естественные понижения рельефа, озера, реки. По условиям образования и хранения опасных отходов буровые установки делятся на три категории: с количеством отходов менее 100 кг в месяц, от 100 до 1000, более 1000 кг. Большинство установок относится к первой категории, поэтому образующиеся отходы должны собираться в отдельные емкости, перевозка которых к местам захоронения (переработки) разрешается лишь при условии специальной маркировки. На буровой установке ведется журнал учета хранения и использования опасных веществ. Буровые установки, на которых в дизель-генераторах и силовых приводах используются дизельное топливо и бензин, являются источниками поставки поллютантов в атмосферный воздух. Каждый такой источник в среднем выбрасывает более 3 т вредных веществ в год при среднем выбросе поллютантов в атмосферу 0,1 г/с. очистные установки на полевых объектах обычно отсутствуют. Проходка поверхностных горных выработок (канав, шурфов, траншей) сопровождается загрязнением почвенного покрова и водных объектов, в том числе в результате сброса в водотоки отвалов горных пород. Площади техногенных нарушений от подземных поисково-разведочных выработок обычно незначительны. В основном они представлены промплощадками с размещенными на них временными сооружениями, отвалами пустых пород, подъездными путями. Проходка выработок приводит к выведению на поверхность горных пород, обогащенных химическими элементами и их соединениями, что предопределяет формирование техногенных геохимических аномалий.

В большинстве случаев в рудах и рудовмещающих породах химические элементы присутствуют в сульфидных формах, которые на дневной поверхности испытывают воздействие разнообразных агентов выветривания [38]. Вынос ливневыми и тальными водами элементов и

их соединений из отвалов пород обуславливает загрязнение почв и природных вод. В отвалах горных пород интенсифицируются процессы гипергенного разрушения первичных и образования вторичных минералов. Миграционная подвижность продуктов выветривания определяется количеством сульфидов и образующейся при их окислении серной кислоты, а также сорбционными, нейтрализующими и осаждающими свойствами горных пород, фиксирующих первичные и вторичные геохимические ореолы. Интенсификация процессов выветривания отвалов горных пород обусловлена также высокой проницаемостью агентов выветривания и хорошими условиями для удаления растворенных продуктов, не успевающих осадиться на геохимических барьерах.

Поисковые и оценочные работы сопровождаются загрязнением территорий производственными и бытовыми отходами, порубочными остатками (на лесных площадях), уничтожением растительности, иногда лесными пожарами [10]. В субарктической зоне уничтожение растительного покрова приводит к развитию термоэрозионных и термокарстовых процессов. Водоотведение в ходе поисково-оценочных работ связано также с хозяйственно-бытовыми сточными водами и стоками вспомогательного производства. Дополнительная поставка поллютантов осуществляется стационарными источниками, приуроченными к поселкам геологоразведчиков.

Геохимические преобразования территорий при добыче полезных ископаемых

На ранних стадиях освоения рудного месторождения элементный состав формирующихся техногенных аномалий (техногенного загрязнения) в целом соответствует геохимической специализации территории. В ходе эксплуатации рудных месторождений интенсивность техногенного воздействия увеличивается, резко меняются характер и интенсивность поступления химических элементов и их соединений в среду обитания, существенно изменяется также качественный состав загрязнения [11, 12, 29, 39-41, 45, 47, 48, 62, 63, 68, 75, 84]. Это связано с интенсификацией процессов механической и водной миграции, обусловленной перемещением больших масс горных пород, с отводом дренажных и сточных вод, с поверхностным стоком с территорий, загрязненных выбросами и отходами, с пылегазовыми выбросами в атмосферу. В общем случае интенсивность проявления техногенных геохимических аномалий определяется типом месторождения, его минералого-геохимическими особенностями и в значительной степени обусловлена системой добычи, хранения и транспортировки руд, объемами и составом извлекаемых горных пород и руд, объемами, составом и способами очистки отводимых дренажных и сточных вод, производственных выбросов, составом и способами обработки и хранения твердых отходов (отвалов, основную массу которых нередко составляют породы, фиксирующие первичные ореолы), а также зависит от характеристик местных ландшафтов. Особое значение имеют такие факторы, как количество сульфидов в разрабатываемой горной породе, степень проработки сульфидсодержащих пород процессами окисления, время существования техногенных отложений, особенности рельефа, активность склоновых процессов и поверхностного стока.

С эколого-геохимической точки зрения наиболее опасными являются промышленно-генетические типы месторождений, разработка которых приводит к резкому увеличению мощности зоны гипергенеза, интенсификации гипергенных процессов и изменению условий

миграции химических элементов, определяющих их повышенную подвижность [16, 25, 32, 33]. При разведке и добыче руд наиболее сильное техногенное загрязнение окружающей среды связано с пылевыми выбросами при открытых горных разработках, загрязняющих атмосферный воздух и образующих интенсивные и значительные по площади геохимические аномалии в наземных системах (почва, снеговой покров), с дефляцией и размыванием отвалов пород, создающих потоки рассеяния в водотоках и сравнительно локальные аномалии в наземных системах, со стоками водоотлива из подземных и поверхностных горных выработок, образующих интенсивные и протяженные потоки рассеяния в водных объектах, с рассеиванием рудного материала при транспортировке, загрязняющего воздух и подстилающую поверхность, с поверхностным стоком с территории горного отвода. Наиболее существенные изменения важнейших условий миграции химических элементов происходят при разработке сульфидных месторождений, характеризующихся наличием в рудах большого количества двойных сульфидов (pH 2-4, Eh до 700 mV), – колчеданных, магматических ликвационных, стратиформных медно-полиметаллических и др. [16]. В водах этих месторождений концентрируются значительные количества тяжелых металлов переходных периодов с низкой валентностью (Pb, Zn, Cu, Co, Ag, Ni и др.). Полярной этой группе по рассматриваемым показателям являются месторождения, связанные со щелочными породами (позднемагматические, карбонатитовые), в водах которых (pH 8,5-12, Eh 200 mV) накапливается значительное количество лигандов-комплексобразователей, способствующих активной миграции химических элементов. В щелочных водах активно мигрируют элементы с высокой валентностью (TR, Cr и др.) и аниогенные элементы (As, F). Особенно опасной представляется разработка месторождений в северных тундрово-лесных районах, где особенно интенсивно проявляются процессы выщелачивания.

Процессы окисления особенно интенсивно протекают при разработке колчеданных месторождений, когда сульфидные руды вступают в контакт с большим количеством свободного кислорода, в результате чего образуются значительные объемы кислых рудничных вод [14, 24, 29, 40, 90, 91]. Практически в любом климате в районе добычи сульфидных руд формируются сернокислые ландшафты. В условиях техногенеза происходит интенсификация процессов внутрипочвенного выветривания. Содержания сульфидов в отходах достигают 10-20% при концентрации многих металлов в десятки-сотни-тысячи раз выше местного фона. Массы химических элементов, накопленные в отвалах пород, могут превышать запасы в балансовых рудах. Воды, образующиеся на отвалах, обычно сбрасываются в поверхностные воды или инфильтруются в ложе и борта мест захоронения и в конечном счете поступают в подземные воды и поверхностные водотоки. В ходе процессов новейшего выветривания в отвалах образуется профиль с вертикальной зональностью окислительно-восстановительного типа. Иногда формируется поверхностная зона окисления в погребенной зоне восстановления.

Отходы и сточные воды современных горных предприятий характеризуются высокими концентрациями многих рудных и сопутствующих компонентов, а также содержат различные вещества техногенного происхождения (нефтепродукты, СПАВ и др.) (табл. 6, 7). При разработке месторождений в атмосферу поступают значительные количества пыли, обогащенной химическими элементами, и газообразные продукты (метан, оксид углерода, оксиды азота, соединения серы, органические соединения), которые выделяются из горных пород и руд или образуются в ходе технологических процессов (при взрывах, бурении, работе авто-

транспорта и других механизмов). Атмосфера рудников по добыче цветных и редких металлов нередко отличается повышенной радиоактивностью [60].

Таблица 6. Химические элементы в рудах, отходах обогащения и шлаках (обобщение литературных данных) [62, 68]

Месторождение	Объект	Порядок значений кларков 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
Вольфрам-молибденовое	Взвесь стока с обогатительной фабрики в хвостохранилище	Bi-Sb	Sn-W-Mo		Ge-Pb-Zn-Mn-Ag-Cu-Co-Nb-Cr-V-P	
	Взвесь стока из хвостохранилища в водоток	Bi-W-Sb-Sn	Mo-Zn		Ge-Mn-Pb-Cu-Nb-V-Sn-B-Zn-Cu-Cr	

Таблица 7. Химический состав сточных вод свинцово-цинковых фабрик, мг/л [55]

Компонент	Сливы со сгустителей				Хвосты флотации	Общий сток
	цинкового	свинцового	медного	пиритного		
Грубые примеси	171	151	184	64300	160000-300000	150000-250000
Сухой остаток	747	668	2030	695	754	830
Хлориды	15,6	14,3	-	33,3	32,8	29,1
Сульфаты	168	169	372	440	250	223
Цианиды:						
свободные	1,8	0,9	2,6	0	2,4	5,6
в комплексе	1,6	4,6	235	2,9	5,9	4,4
Cu в комплексе с цианидами	1,2	3,75	192	2,4	4,8	4,7
Zn в комплексе с цианидами	0,5	-	-	0,5	-	8,8
Свинец	1,5	0,43	0,14	0,37	2,7	0,8
Цинк	1,03	0,97	2,25	-	10,1	6,5
Сосновое масло	17,2	25,7	24	-	8	25,2
Фенолы	2,4	2,3	10,4	3,4	4,7	16
Ксантогенаты	0,6	0,3	1,9	0,14	0,48	2,4
Дитиофосфаты	2	0,5	2,5	0,05	1,6	2,3
Расход стоков, м ³ /сут	60-2300	160-1980	43-420	200-470	300-6900	6620-3670

Необходимо отметить, что в прошлые годы (XVIII – начало XX в.) потери полезных компонентов при добыче и обогащении руд были особенно значительными. Например, средние потери олова на рудниках Корнуолла в начале XX в. составляли не менее 30%, достигая в некоторых случаях 40-60% [58]. Поскольку обогатительные фабрики практически всегда строились вблизи рек, то в них уходила значительная часть хвостов, в результате чего река ниже фабрик загрязнялась на значительном расстоянии. Обычно ниже обогатительных фабрик русла и поймы рек достаточно сильно заилены фабричными шлаками, а геохимическое опробование на таких участках обнаруживает интенсивные аномалии разных металлов на

значительной протяженности русла [32]. Так, в рудном поле северо-восточного Корнуолла, где добывались свинец и сурьма, донные отложения р. Оллен в 8 км ниже давно заброшенной обогатительной фабрики рудника Пенджена содержат до 150-3000 мг/кг свинца, а уровни олова в речных отложениях на участке Лендс-Энд ниже обогатительной фабрики достигают 5000 мг/кг [58], что существенно выше кларка этих металлов.

Критерии различия рудогенных и техногенных геохимических аномалий

При проведении оценки влияния техногенного загрязнения с целью интерпретации геохимических аномалий необходимо, прежде всего, выяснить историю горнорудного освоения данной территории, а также иметь общее представление о степени и характере техногенного воздействия, свойственного исследуемому региону. Определенную информацию можно почерпнуть из специальных карт. Например, сотрудниками Московского государственного горного университета создана прогнозная ландшафтно-геохимическая карта горнопромышленного загрязнения территории России м-ба 1:4000000, на которой значками показаны объекты горнопромышленного воздействия (карьеры, разрезы, рудники, шахты и др.) и выделено около 1000 источников техногенного загрязнения, влияющих на 76 видов геохимических ландшафтов [6]. В ВИЭМС`е составлена карта экологических условий размещения минерально-сырьевой базы и проведения геологоразведочных работ в России в м-бе 1:5000000. На карте даются границы бассейнов различных типов полезных ископаемых и (наряду с другими) приведены показатели, характеризующие интенсивность и специфику техногенного загрязнения территорий освоения минерально-сырьевой базы и проведения геологоразведочных работ [18].

Для разбраковки аномалий могут использоваться данные по их морфоструктурным особенностям. В частности, пространственная конфигурация техногенных геохимических аномалий в депонирующих средах (прежде всего, в почвах и рыхлых отложениях) практически всегда не согласуется с геологическим строением района месторождения, а очень часто (в почвах) определяется преобладающим направлением ветров и характером рельефа [40, 41]. В природных условиях пространственное распределение геохимических аномалий в существенной мере определяются геохимической специализацией геологических комплексов. Состав природных аномалий, например в донных отложениях водотоков, достаточно хорошо коррелирует с минералого-геохимическими особенностями дренируемых месторождений [23, 32, 56]. В крупнообломочных отложениях рудогенные геохимические аномалии часто проявляются не менее интенсивно, нежели в тонкозернистых отложениях, что обычно характерно для техногенных потоков. Например, в донных отложениях р. Экклесборн (Дербишир, Великобритания), верхняя часть русла которой проходит через выходящую на поверхность жилу полиметаллической руды, содержание свинца, цинка и кадмия в мелких частицах и в крупных частицах было примерно одинаковым [87].

Достаточно давно установлено, что в старых горнорудных районах техногенные аномалии металлов, фиксируемые в почвах, относительно локализованы и обычно приурочены к их верхнему слою [19, 57]. Например, в известном горнорудном районе Кер-д`Ален (Айдахо) было обнаружено, что образцы почв с глубины больше 15 см обычно не загрязнены [19]. Изучение распределения свинца и цинка в компонентах наземной среды в районе заброшен-

ных рудников в Сев. Уэльсе показало, что уровни металлов в верхнем слое почв резко уменьшаются с удалением от отвалов, являющихся основным источником загрязнения [85, 89]. Максимальные концентрации металлов в почвах наблюдались вблизи отвалов (5000 и 11000 мг/кг соответственно), а фоновый уровень устанавливался на расстоянии в 600-750 м от них. С глубиной содержание тяжелых металлов резко снижалось. Тем не менее выщелачивание из старых окисленных шламов и рудничных отвалов может обусловить рассеяние металлов на большую глубину и даже приводить к загрязнению участков высачивания грунтовых вод, расположенных на заметном расстоянии вниз по склону [57]. Особенно существенная геохимическая трансформация наблюдается в почвах, погребенных под отвалами. Так, в почвах, погребенных более 20 лет назад, происходит сильное подкисление всего почвенного профиля (рН до 3,5-4,0), разрушаются почвенные коллоиды, нарушается почвенный поглощающий комплекс, становится подвижным органическое вещество, происходит вынос кальция и магния из гумусового горизонта [30]. Горизонты почв обогащаются рудными компонентами, глубина проникновения которых для различных химических элементов неодинакова. Все это свидетельствует о подвижности элементов в отвалах, которые часто практически никак не изолированы от водных систем. Следует особо отметить, что на рудных месторождениях, перекрытых покровом более поздних осадочных отложений (даже мощностью более 100 м), практически повсеместно развиваются эпигенетические наложенные ореолы, особенно интенсивно проявляющиеся в почвах [25]. В данном случае возникает определенная трудность при разбраковке рудогенных и техногенных аномалий, поскольку сравниваемые виды аномалий по рассматриваемому признаку различаются плохо. Тем не менее наложенные ореолы отличаются низкими уровнями валового содержания элементов-индикаторов, а геохимические аномалии (как правило, незначительной интенсивности) выявляются по формам нахождения элементов, наиболее распространенными из которых являются сульфаты, хлориды, сорбированный комплекс, карбонаты, органоминеральные соединения.

Нередко техногенные аномалии имеют линейную форму, поскольку образовались вдоль троп, проложенных горняками, или вдоль дорог, по которым осуществлялась транспортировка руды [19, 58, 83]. Так, в Корнуолле – старом горнорудном районе Англии – в настоящее время, как отмечает К.Ф.Г. Хоскинг [58], многие рудничные тропы заросли и могут ввести в заблуждение при проведении геохимических работ, особенно если анализируемые пробы почв взяты из самых приповерхностных горизонтов. При опробовании более глубоких горизонтов подобные затруднения тем более возможны, если исследуются такие подвижные металлы, как медь и цинк, и если рудники в районе были богаты рудой, содержащей сульфиды этих элементов в ассоциации с пиритом, марказитом или пирротинном. В таких условиях легко окисляющееся железо сульфидов дает сульфат окисного железа – прекрасный растворитель для сульфидов многих элементов. Электроэффект также способствует гораздо более быстрому растворению некоторых компонентов сложных сульфидов по сравнению с растворимостью этих компонентов в тех же условиях, но в изолированном от других сульфидов состоянии.

В большинстве случаев в техногенных геохимических аномалиях, фиксируемых почвами и донными отложениями, ассоциируются химические элементы (отличающиеся очень высокими концентрациями относительно фона или кларка), совместно не встречающиеся или встречающиеся очень редко в повышенных содержаниях в рудогенных аномалиях. Для

примера приводятся данные по техногенным геохимическим ассоциациям, свойственных донным отложениям водотоков техногенных ландшафтов (табл. 8, 9).

Таблица 8. Геохимические ассоциации в донных отложениях водотоков сельскохозяйственных ландшафтов [64]

Хозяйственное освоение бассейнов		Порядок значений коэффициентов концентрации K_C химических элементов			
		> 30	30 – 10	10 – 3	3 – 1,5
Животноводство	Крупнорогатый скот	Hg	Ag	Zn-Se-As-Sn-P-Cu-Mo-Cd	Sc-Sr-Ga-W-Pb-Co-Mn-Y-Pb-F
	Свиноводство	-	Ag-Hg	Zn-As-Se-P	Sr-Cd-Ba-Sn-W-Sc-Cu-Mo-Y-Pb
Комплексное освоение	р. Сосенка	-	-	P-Mn-Ga-Cu-Sc-Cd-Ni-Nb	As-Y-Zn-Sn-Hg-Ba-Pb-Yb-Ag-Mo-Cr-La-V-F
	р. Страдань	-	-	Hg-Sn-Bi	As-Se-Cr-Ni-Co-Ga-Mn-Nb-La-V-P-Ag-F-Cd
	р. Сохна	-	-	Ag	P-Sn-F-Mo-Nb-Cr-Cu-Zn-Mn-Yb-Ba-As-Se-La
Земледелие	р. Жданка	-	-	P-Sc-Cu	Mn-Nb-Ag-Mo-Cr-Zr-F-Y-Cd-Co-Pb-Yb-As
	р. Ярцевка	-	-	Mn	V-Ga-P-Co-Nb-Yb-B-Cd-Cr-Pb-Ag-Mo-Sc-Pb-F
Агропоселки		-	Ag	Co-P	V-Bi-Ni-Zn-Pb-Ba-Ga-Mn-Zr-Nb-Mo-Yb-Be

Таблица 9. Геохимические ассоциации в донных отложениях водотоков бассейна Пахры [64]

Промышленная нагрузка	Город	Порядок значений коэффициентов концентраций K_C химических элементов				
		> 100	100 – 30	30 – 10	10 – 3	3 – 1,5
Комплексное производство	Подольск	Hg-Ag	Cd-In	Cu-Ni-Pb-Sn-Sb-Se	V-Zn-Cr-Nb-P-W-As-Bi-Sr-Ba	Co-Be-Mo-Sc-F-Y
	Домодедово	-	Ag	Cd-Ce	Zn-Se-Hg-Sb-Sn-As-Pb	P-Cu-Sc-Sr-Ti-Co-Bi-Ni-Ba
Химическая промышленность	Бутово	-	-	Hg	Sn-Ag-Sc-Cr-Ga-P-Pb-Mo	Ti-Co-Nb-Cu-Ba-V-Sr-Sc-As-F
	Апрелевка	Hg-Ag	Ni	Cd-Sr	Cu	Pb-As-Se-Co-Bi
	Подольск	-	-	Sn	Ag-Cd-Cu-Ba-Co-Hg	Zr-Pb-Ni-ScTi-V-Zn-Sr-P
Машиностроение	Подольск	Hg	Ag	-	Zn-Sr-Pb-Bi-Sc-Ba-Cd	Cu-Y-Co-Ni-Li-Cr-As-Se
Вторичное производство цветных металлов	Львовский	Hg-Ag	Pb-Bi	P-Cu-Zn	Sb-Sn-Ba-Cd-F	Co-Ga-Cr-Sr-As
	Щербинка	Ag-Hg	-	Cu	Cd-Zn-Bi-P-Sr-Cr-Ni	Ba-Co-Pb-Sc-Zr-Mo-As-Se
Коксохимия	Видное	-	-	Hg	Zn-Mo-Cu-Sr	Ni-Ag-Co-Nb-Sc-Li-Cr-Cd
Легкая	Троицкий	-	-	-	Sn-Ag-Mo-	Sr-Ni-Zn-Mn-Hg-Be-Cu-Cd
Свалка бытовых и промышленных отходов		Ag-Sn	Cd-Ni	Sb-Cu	Hg-Pb-Zn-Cr	Co-Sc-Zr-Ba-As-Mn-Ba-Sr

Очень показательны данные по Северной Осетии, где существуют длительное время эксплуатируемые полиметаллические месторождения (табл. 10). Здесь в донных отложениях рек фиксируются интенсивные, полиэлементные и протяженные техногенные геохимические аномалии, что в существенной мере обусловлено поступлением (со сточными водами и поверхностным стоком) огромных масс техногенного твердого материала, отличающегося специфическим химическим составом [62-64, 72, 73]. Наблюдается увеличение качественных и количественных характеристик техногенных геохимических аномалий в ряду воздействия «разведка – добыча – обогащение – переработка полиметаллических руд», т. е., говоря проще, возрастают интенсивность и масштабы техногенного загрязнения. Одновременно резко меняются соотношения между концентрациями химических элементов, характерные для природных условий (в том числе, для рудогенных аномалий).

Таблица 10. Геохимические ассоциации в донных отложениях рек горнорудного района (обобщенные данные по Северной Осетии) [64]

Источник воздействия (период)	Порядок значений коэффициентов концентраций K_C элементов					Длина, км
	> 100	100-30	30-10	10-3	3-1,5	
Природные	-	-	-	-	Pb-Zn-Bi-Sn-Y	0,1-0,6
Разведочные выработки	-	-	-	Pb	Zn-Cu-Ag-Bi	1-3
Горнорудные (20 лет)	-	-	Zn-Ag	Pb	Cu-Nb-Ga-Y-As	5*
То же (35 лет)	-	-	Zn	Pb-Ag	Ba-Nb-Cu-Y-Sr-Bi-As	6**
То же (150 лет)	-	Pb	Zn	Ag-Cu	Ga-Ni-Co-Sn-Bi-Nb-As	> 6
Горно-обогатительные (15 лет)	-	-	Zn	Pb-As	Y-Cu-Sc-Ag-Co-Ba-Sb-Bi	> 40
То же (90 лет)	-	Zn-Ag-Pb	Cu	Ba-Bi-Cd-As	Mn-Mo-Sn-Co-Zr-Nb-Hg-Sb	> 60
Металлургические заводы	Ag-Cd-Zn-W-Pb-Hg	Mo-Sn-Bi-In	As-Co	Nb-Sb	Ga-Ni-Mn-Sr	> 80***
Материал из хвостохранилищ	Ag	Pb-Cd	Ba-Zn-Cu-As	Bi-Mo-Sb	Sn-Co-Nb	-
Полиметаллические руды	Cd-Zn-Ag-Pb	Cu-Bi	Mo	Sn-Co	Y-Ga-Sr	-
Шламы завода «Электротроцинк»	Ag-Cd-Zn-Pb	Cu-Mo	Co-Sn-Ni	Mn-Bi	W	-

* Зона загрязнения прослеживается в водотоках первого порядка до устья.

** Фиксируется в водотоке следующего порядка.

*** Переходит в водотоки следующих порядков.

Интенсивность концентрирования (степень аномальности) многих сопутствующих рудных элементов (элементов-примесей) в техногенных аномалиях выше, нежели в их природных (рудогенных) 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 (табл. 10). Обычно при переходе техногенного потока рассеяния в водоток более крупного порядка за счет разбавления природным материалом снижается уровень концентрирования поллютантов и, соответственно, уменьшается количество «аномальных» элементов. Если прослеженная протяженность природных геохимических аномалий (рудогенных потоков рассеяния) составляет, как правило, первые сотни метров, то длина техногенных потоков рассеяния достигает несколько десятков километров. В пространственном отношении техногенные потоки рассеяния в донных отложениях отличаются чрезвычайно резким варьирующим распределением элементов. Однако эта вариация фиксируется при значительных уровнях их содержаний и происходит при ярко выраженной пространственной корреляции основных элементов аномалии. Лишь на геохимических барьерах (устья водотоков, участки резкого выполаживания русла и т. п.) наблюдается дифференциация ассоциаций. В большинстве случаев техногенные потоки развиваются лишь в современных русловых отложениях, в то время как рудогенные потоки могут захватывать днище речной долины. Очень разнообразный состав аномалий установлен также для техногенных потоков в растворе речных вод [43, 44, 48], что не свойственно рудогенным водным потокам.

Для старых районов добычи олова и полиметаллических руд характерно масштабное загрязнение окружающей среды мышьяком [58, 83, 88]. При этом, как отмечает [58], заражение мышьяком обусловлено не только арсенопиритом и другими As-содержащими минералами, имеющимися в хвостах обогатительных фабрик, но вызвано, кроме того, обогащением

оловянных руд из полиметаллических рудных зон, включающим кальцинирование, при котором сульфиды и сульфоарсениды переходят в компоненты, легко отделимые от касситерита гравитационным или магнитным методами. Сернистый газ, выделяющийся при кальцинировании сульфидов, содержал значительное количество оксидов мышьяка, которые в составе выбросов осаждались на почву. Известны случаи гибели крупного рогатого скота и других животных, отравившихся травой, произрастающей вблизи градирен горно-обогачительных фабрик.

Известен способ оценки доли техногенной нагрузки химическими элементами, основанный на построении карт геохимических ассоциаций, фиксируемых почвами и донными отложениями [47]. Таксономические градации такого картирования обусловлены индивидуальной или групповой нагрузкой (долей) элементов в структурах тех или иных ассоциаций. Составленные по этой методике карты, показывая насыщенность техногенных ассоциаций металлами, в то же время, при известных структурах ассоциаций и продолжительности существования точечных техногенных источников их формирования, дают возможность прогнозировать направления движения техногенных потоков. Предполагается, что данный способ позволяет оценить условия и уровни геохимической трансформации в старых районах добычи и переработки минерального сырья. В частности, установлено, что в районах месторождений разнообразного минерального сырья Урала в условиях длительного и активного техногенеза сформировались своеобразные и интенсивно проявляющиеся гидрогеохимические системы. Неоднородность выноса и накопления химических элементов в таких системах привела в условиях Урала к их дифференцированной и во многих случаях к необычайно интенсивной металлоносности.

Для надежной разбраковки техногенных и рудогенных аномалий эффективно установление форм нахождения химических элементов в почвах и донных отложениях. Известно, что в рудогенных ореолах и потоках, фиксируемых рыхлыми отложениями, в общем балансе нередко существенно преобладает так называемая силикатная форма нахождения рудных и сопутствующих элементов. В условиях техногенного воздействия, с одной стороны, наблюдается более разнообразный качественный состав форм нахождения металлов, с другой – доминирующее значение приобретают подвижные форм (сорбционные, карбонатные, обменные, связанные со свежесажденными оксидами и гидроксидами железа и т. п.), а также различные органические соединения металлов, не свойственные в таком количестве рудогенным геохимическим аномалиям [34, 43, 53, 65, 66, 81]. В свое время А. Левинсон [19] подчеркивал, что одна из характерных особенностей техногенного загрязнения в горнорудных районах – это то, что отношение металлов, которые можно выделить холодной экстракцией, к общему содержанию тяжелых металлов в почвах или в донных отложениях обычно выше, чем получают из подобных, но незагрязненных образцов с той же территории.

Японские исследователи изучали распределения тяжелых металлов в донных отложениях рек, протекающих через горнорудные и городские районы [92]. Для выявления форм нахождения металлов применялась последовательная экстракция их из образцов с помощью $2\text{H}-\text{CH}_3\text{COONH}_4$, $0,1\text{M}-\text{EDTA}$ и $0,5\text{H}-\text{HCl}$ и разложение с $\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}_2$. Было установлено, что из донных отложений рек горнорудных районов $\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}_2$ извлекается до 70-80% металлов, что указывает на преобладающие присутствие их в составе рудных минералов. В донных отложениях городских рек доля данной фракции не превышала 20-30%; здесь преобладали формы, извлекаемые $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ или $0,1\text{M}-\text{EDTA}$. Исследования [74], выполненные в

районе месторождений свинца и цинка, расположенных в американских штатах Миссури, Канзас и Оклахома и активно разрабатывавшихся до 1950-х гг., показали, что в загрязненных почвах, отличающихся высокими концентрациями Pb, Cd, Zn, формы нахождения указанных металлов были чрезвычайно разнообразные (сульфиды, карбонаты, органические соединения, сорбированные и обменные формы). Для Pb сорбированные формы преобладали над органическими, для Cd и Zn, наоборот, органические формы доминировали над карбонатными. Такое разнообразие форм металлов, обусловленное их нахождением в отвалах переработки руд, для рудогенных аномалий не наблюдалось. Изучение форм нахождения металлов в донных отложениях эстуария, в который впадает ручей, дренирующий район медного месторождения (о. Англиси, Сев. Уэльс, эксплуатировалось до конца XIX в.), позволило установить, что около 50% цинка и 90% меди находится в потенциально подвижных формах (в основном связаны со свежесажденными гидроксидами железа и марганца) [82]. В донных отложениях небольшой реки, протекающей в районе старых медных рудников, действовавших в 1850-1902 гг. к юго-востоку от г. Стокгольма, обнаружены высокие содержания гидроксидов железа, марганца и алюминия, с которыми были связаны многие металлы, присутствующие в обменном комплексе. Кроме того, медь и свинец достаточно активно связывались с органическим веществом [86]. В зоне влияния Удоканского медного месторождения на начальных этапах освоения наблюдается загрязнение почв гидроксидом меди $\text{Cu}(\text{OH})_2$; затем это исходное соединение последовательно проходит несколько форм нахождения в твердой фазе [8]. Так, установлено, что с течением времени после загрязнения почв основной формой нахождения меди становится карбонатная (60%), затем следуют аморфная (20%) и органическая (10%) формы. Силикатная форма имеет меньшее распространение (6%), еще меньше – водорастворимая и обменная формы (активно выносятся с загрязненной территории).

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 [54]: 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 (русловых) отложений в зоне загрязнения было также характерно высокое содержание карбонатных и ионообменных форм.

Показательно, что вне зон техногенного воздействия формирование так называемых ложных геохимических аномалий, не связанных с рудной минерализацией, также происходит главным образом за счет формирования относительно подвижных форм металлов. Например, в результате регионального геохимического опробования донных отложений в районе развития свинцово-цинково-медной минерализации в Сев. Ирландии установлено три типа аномалий цветных металлов: истинные кластические (рудогенные), истинные гидроморфические и ложные гидроморфические [76]. Кластические аномалии, образовавшиеся за

счет рудной минерализации, характеризуются повышенными концентрациями цинка, свинца и(или) меди. Истинные гидроморфические аномалии также образовались за счет размыва оруденелых участков. Ложные гидроморфические аномалии произошли за счет выщелачивания цинка и ряда других металлов из кислых и(или) глеевых почв и последующей концентрации их в потоках при соосаждении с гидроксидами марганца. Отличительной особенностью истинных гидроморфических аномалий в этом случае является аномальное отношение Zn/Mn.

Швейцарские исследователи провели сравнительное изучение поведения химических элементов в «молодых» и «старых» сульфидных хвостах обогащения медно-золотых месторождений (пояс Пунта-дель-Кобре, север Чили) [79]. Было установлено, что старые хвосты характеризуются чередованием участков высокой кислотности и высокой нейтрализующей способности (по соотношению пирита и кальцита), молодые хвосты – высокой кислотностью. Кислый дренаж из последних, поступая в старые хвосты, в участках нейтрализации образует зоны цементации (гипс + ферригидрит + гётит + ярозит) с содержанием меди до 6800, цинка до 680, мышьяка до 1100 мг/кг, которые накапливаются во вторичных сульфидах. Засушливый климат пустыни Атакама высушивает крупнозернистые агрегаты, препятствуя их окислению; влага сохраняется только в тонкозернистых агрегатах. В то же время часть дренажа молодых хвостов имеет нейтральный характер, где Fe^{3+} переносится в виде полимеров или коллоидов; такой дренаж во многом определяет высокую степень накопления металлов в зоне цементации.

Для идентификации генезиса техногенных геохимических аномалий ртути действительно использование термического атомно-абсорбционного метода. Установлено, что значимые выделения ртути из природных образцов (минералы, горные породы, природные почвы и аллювий) при температуре их нагрева до 200-250°C и особенно до 100°C наблюдаются редко, тогда как для загрязненных почв и техногенных речных илов, промышленных шламов и осадков сточных вод, городской пыли (твердых выпадений из атмосферы) практически всегда фиксируется существенный выход данной фракции этого металла [3-5, 26, 33, 49-52, 66] (рис. 1, 2).

При интерпретации результатов геохимического изучения старых горнорудных районов могут использоваться данные по общему химическому составу отложений, являющихся основными депонентами геохимических аномалий. Так, в руслах рек в зонах техногенного загрязнения в большинстве случаев происходит формирования специфических русловых отложений (техногенных илов), кардинально отличающихся своим петрохимическим составом от природного руслового аллювия и природных почв (табл. 11). Например, от типичного (природного) руслового аллювия илы отличаются меньшим количеством кремнезема, более высокими содержаниями органического вещества (что находит отражение в значениях показателя потерь при прокаливании), глинозема, оксидов кальция и железа, закиси железа, бикарбонатов и др. Отличие русловых отложений, формирующихся в зоне загрязнения, наглядно проявляется в значениях петрохимических модулей (табл. 12). Так, для природных образований (аллювия и почв) значения практически всех петрохимических показателей очень близки. Это, в частности, указывает на то, что существенным источником формирования руслового аллювия является поступающий с водосбора осадочных материалов, тогда как образование илов происходит в результате накопления в русле реки твердого осадочного ма-

териала, поступающего со сточными водами и загрязненным поверхностным стоком с освоенных территорий.

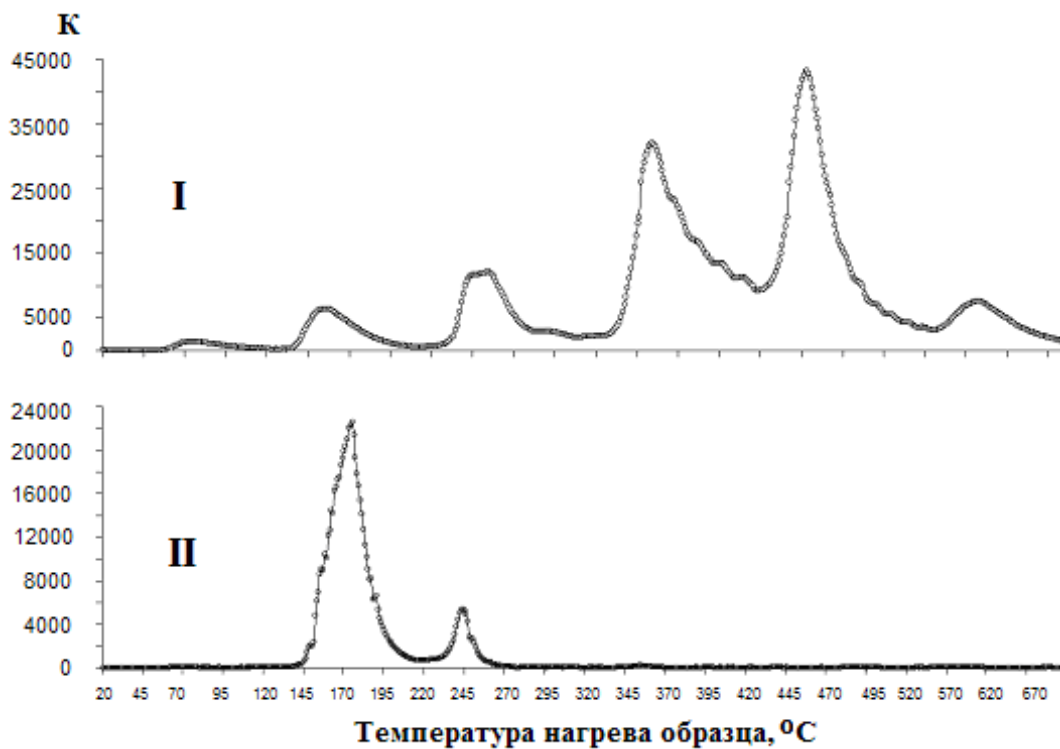


Рис. 1. Кинетика выхода ртути из различных образцов [26]: I – руда, золоторудное месторождение «Олимпиада», Красноярский край; II – техногенный речной ил, р. Нура, Центр. Казахстан; К – выход ртути, условные единицы

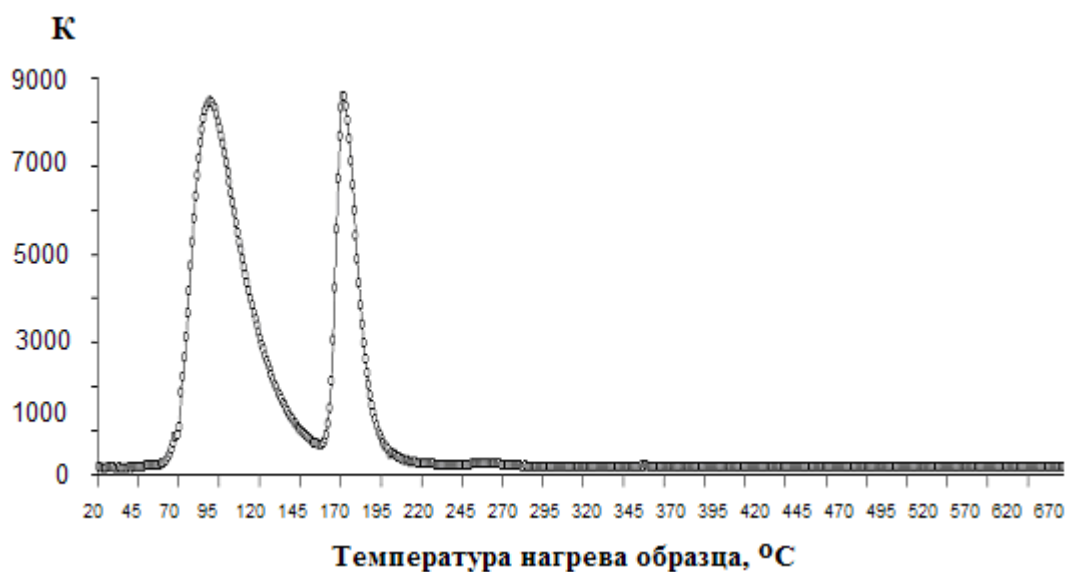


Рис. 2. Кинетика выхода ртути из пыли, осажденной со снегом, г. Москва [26]; К – выход ртути, условные единицы

Таблица 11. Петрохимический состав различных отложений, % [67]

Компонент	Фоновые почвы	Фоновый аллювий	Техногенные илы
SiO ₂	73,69	81,63	62,32
TiO ₂	0,54	0,33	0,64
Al ₂ O ₃	6,41	5,22	10,52
Fe ₂ O ₃	2,59	4,03	4,24
FeO	0,47	0,57	1,36
MnO	0,20	0,078	0,075
CaO	0,47	0,78	2,20
MgO	0,70	0,37	1,16
Na ₂ O	0,55	0,56	0,98
K ₂ O	1,48	1,05	1,89
P ₂ O ₅	0,14	0,19	0,49
H ₂ O	4,98	1,37	2,50
ППП *	7,20	3,66	10,48
S	< 0,10	< 0,10	0,17
CO ₂	0,22	0,66	1,32

* ППП – потери при прокаливании.

Таблица 12. Петрохимические показатели отложений (см. табл. 11)

Показатель	Почвы	Аллювий	Илы
Гидролизатный (Al ₂ O ₃ +TiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +FeO / SiO ₂)	0,12	0,14	0,31
Алюмокремниевый (Al ₂ O ₃ / SiO ₂)	0,09	0,06	0,18
Калиевый (K ₂ O / Al ₂ O ₃)	0,23	0,21	0,17
Плагиоклазовый (Na ₂ O+CaO / K ₂ O)	0,69	1,28	1,65
Зрелости, по Ф. Петтиджону (SiO ₂ / Al ₂ O ₃)	11,50	15,64	5,32
Степени дифференциации (SiO ₂ / K ₂ O + Na ₂ O)	36,30	50,70	20,79
Зрелости материала пород областей сноса (Al ₂ O ₃ / SiO ₂ + MgO + K ₂ O + Na ₂ O)	0,08	0,06	0,18
Закаисный (FeO / Fe ₂ O ₃)	0,18	0,14	0,71
Окисления (Fe ₂ O ₃ / FeO)	5,51	7,07	1,40
Органокремниевый (ППП / SiO ₂)	0,09	0,05	0,21
Кремниевый (SiO ₂ / R ₂ O ₃)	15,5	17,8	7,4

В районах рудников и горно-обогатительных фабрик, действовавших 30-50 лет назад, практически всегда в донных отложениях водных объектов и почвах обнаруживаются повышенные содержания таких специфических органических веществ, как различные агенты флотационного обогащения, нефтепродукты, СПАВ и др. [69]. Кроме того, техногенные илы и близкие к ним разновидности русловых отложений, формирующиеся в зоне воздействия промышленных объектов, в отличие от естественного (фонового) аллювия характеризуются не только повышенным (в несколько раз по сравнению с фоном) общим содержанием органического вещества, но и существенной трансформацией его качественного состава [35]. Это, в первую очередь, проявляется в росте абсолютного и относительного содержания жироподобных веществ (липидов) и трудноокисляемой (устойчивой) органики. Относительное содержание гумусовых веществ в техногенных илах снижается, однако при этом наблюдается значительное увеличение их абсолютной концентрации. В зонах максимального техногенного воздействия содержание гуминовых кислот обычно превышает количество фульвокислот. По мере удаления от города уменьшение общего содержания органических веществ в илах происходит в основном за счет снижения в них количества гуминовых кислот и труднорастворимых органических соединений; в составе гумусовых веществ техногенных илов уже преобладают фульвокислоты.

Техногенным речным илам свойственны минеральные ассоциации, состав которых отличается от терригенно-минеральных ассоциаций, типичных для фонового аллювия. В част-

ности], техногенные минеральные ассоциации характеризуются пониженным содержанием кварца, роговой обманки, эпидота, полевых шпатов, увеличенным количеством карбонатных минералов, гидроокислов железа, лимонитизированных обломков и других аутигенных новообразований, апатита, дистена, а также присутствием глинистых минералов, муллита, портландита и других минералов, свойственных промышленным отходам [67, 70]. В техногенных илах и в близких к ним разновидностях речных отложений практически повсеместно присутствуют разнообразные искусственные частицы – кусочки резины, древесных материалов, пластмассы и полиэтилена, мелкие металлические фрагменты, обломки искусственного стекла, мелкие частицы шлака, бетона, кирпича, искусственных битумных и волокнистых материалов и т. д., поступающие в водотоки с поверхностным стоком и сточными водами и, по сути, являющиеся составной частью данного типа отложений [67, 71].

Существенные изменения минерального состава и органического вещества происходят и в загрязненных отвалами почвах. Например, минералогическое изучение продуктов выветривания отвалов сульфидных железомедных рудников на Северных Апеннинах (Италия), разработка которых началась в XIX в. и закончилась в начале 1960-х гг., показало, что в рудах месторождений основную часть составляют пирит и халькопирит при подчиненном значении магнетита, сфалерита и пирротина [78]. В отвалах установлены два типа тонкозернистых продуктов выветривания. Один из них имеет характерный голубой цвет и представляет собой по составу Cu-Al-сульфат группы вудвардита. Эти гелеподобные продукты, образование которых связано с наличием щелочного геохимического барьера, развиты по обломкам пород отвалов. Второй тип продуктов имеет охристый цвет с преобладанием в нем в одном отвале гётита, в другом – ферригидрита. Обычно эти образования встречаются в виде оторочек вдоль увлажненных участков почвы. В условиях отработки Джеккаганского и Коунрадского месторождений установлено, что в поверхностных условиях первичные сульфиды меди (халькозин, дигенит и джарлеит) на начальных стадиях окисления переходят в нестехиометричные маломедистые сульфиды (анилит, джирит, спионкопит, ярроуит), последовательно замещающие друг друга [7]. Конечным сульфидным минералом этой последовательности является ковеллин. Увеличение дефицита меди в наблюдаемом ряду сопровождается возрастанием доли двухвалентной (окисленной) меди в кристаллической решетке минералов. Исследования, выполненные в зоне воздействия Костомушского ГОКа, показали, что в условиях техногенного загрязнения происходит заметное снижение активности ферментного комплекса в верхнем почвенном горизонте [20]. В частности, активность каталазы уменьшалась на 24%, уреазы – на 61 %, протеазы – на 62 % по сравнению с контролем. Кроме того, авторы цитируемой работы, кроме биохимических показателей, предлагает также различные микробиально-биологические показатели, которые могут использоваться для диагностики техногенного-нарушенных почв, по крайней мере, вблизи источников загрязнения.

В районе действующих крупных горно-обогатительных комбинатов эффективно опробование снегового покрова, фиксирующего состав и пространственную структуру современного загрязнения, формирующегося в результате пылегазовых выбросов [40, 41]. Обычно исследуется химический состав пыли, осаждаемый со снегом, что позволяет установить характерный для данного типа источника состав формирующихся в почвах геохимических аномалий. Пространственная структура и дальность воздействия комбината на ландшафты надежно фиксируются по значениям рН, содержанию ряда макрокомпонентов (сульфаты, натрий и

др.) в снеговой воде [80]. В Карело-Кольском регионе обычно максимальный радиус воздействия выбросов достигает 6-8 км от источника загрязнения.

Диагностика свинца, поступающего из техногенных источников и накапливающегося в тех или иных компонентах среды (почвы, донные отложения), возможна по соотношениям его стабильных изотопов $^{206}/^{204}$, $^{207}/^{204}$, $^{208}/^{204}$, $^{207}/^{206}$, $^{208}/^{206}$ [27]. Установлено, что каждый техногенный источник имеет достаточно характерную изотопную «метку» и его вклад может быть оценен на фоне других, в том числе литогенных источников.

Сравнительный анализ природных (рудогенных) и техногенных (антропогенных) аномалий (геохимических ореолов), характеризующих два типа геохимических ситуаций, существующих на территориях близкого размера (рудное поле – промышленный город), приведен в табл. 13.

Таблица 13. Сравнительная характеристика рудогенных и техногенных геохимических аномалий (геохимических ореолов) [37]

Показатель	Рудогенные	Техногенные
Площади распространения сближенных серий ореолов (рудное поле – промышленный район)	$n \times 10 - n \times 100 \text{ км}^2$	$n \times 10 - n \times 100 \text{ км}^2$
Насыщенность территории ореолами	20-25%	25-40%
Площадь отдельных ореолов в контуре $> Ca_1$	$0, n - n \text{ км}^2$	$n - 10n \text{ км}^2$
Площадь отдельных ореолов в контуре $> Ca_3$	$0, 0n - 0, n \text{ км}^2$	$0, n - n \text{ км}^2$
Коэффициенты концентрации элементов в центрах ореолов (типичные значения)	до 15 (Cu, Zn, Pb, Mo, Ba) до 10 (As, Ag, W, Sn, Hg)	до 100 (Cd, W, Zn, Cu, Sn, Hg) до 10 (Mo, Ni, Pb, Cr)
Характер комплексности состава ореолов	Полиэлементные ассоциации, выдержанные по составу в серии ореолов и зонально распределенные в отдельных ореолах	Полиэлементные ассоциации, невыдержанные по составу в серии ореолов и со слабым проявлением зональности в отдельных ореолах
Интенсивность концентрирования металлов в растениях и животных в пределах ореолов	до 2-3 (Cd, Pb, Zn, Ni, Sn) до 5-8 (Hg, Cu)	до 10-15 (Cd, Hg, Cu, Pb) до 3-5 (Zn, Ni, Sn)
Факторы, контролирующие распределение ореолов на площади	1) геологическая структура, формационный и геохимический облик пород; 2) история развития и современный тип ландшафта, организующего природные потоки вещества	1) хозяйственная (функциональная) структура, гидрометеорологические особенности; 2) современный тип ландшафта, характер и интенсивность преобразования природных потоков миграции хозяйственной деятельностью

В свое время В.И. Вернадский подчеркивал, что «рудная деятельность человечества является одним из больших биогеохимических процессов современной эпохи и вносит новое в геохимию всех химических элементов» [2]. Действительно, в потенциале практически любое рудное месторождение – мощный источник загрязнения окружающей среды комплексного характера [14, 40, 41, 62, 68]. Это связано с обязательным присутствием повышенных концентраций широкой ассоциации химических элементов в добываемых и перерабатываемых рудах и в отходах производства, нередко составляющих до 98% извлекаемой горной массы. Комплексность месторождений как источников загрязнения проявляется также в разнообразии охватываемых загрязнением природных компонентов. Специфические особенности влияния горнорудного производства на окружающую среду обуславливается прежде всего

геолого-геохимическими особенностями месторождений, различающихся ассоциациями химических элементов, участвующих в природных или техногенных миграционных цепях. В то же время степень проявления той или иной миграционной цепи (и, следовательно, степень ее экологической опасности) в существенной мере связаны с принятой системой добычи и обогащения руд. Зоны загрязнения на участках действия миграционной цепи выбросов в атмосферу обусловлены открытой добычей, дробильными процессами и пылением отвалов (хвостохранилищ). Эти зоны, формирование которых в принципе неизбежно, в существенной степени определяют качество воздуха, почвы и растительной продукции. Тем не менее в данном случае, как правило, наиболее интенсивное техногенное воздействие, фиксируемое экстремально высокими концентрациями поллютантов, приурочено к основным источникам загрязнения. Зоны загрязнения на участках проявления водно-миграционных потоков обусловлены стоками из хранилищ отходов и водоотливом из горных выработок. Эти зоны проявляются в поверхностных водотоках и водоемах, в грунтовых, аллювиальных и подотваль-ных водах, в почвах пойменных ландшафтов, а также на сельскохозяйственных территориях, где орошения используются загрязненные речные воды. Особенно интенсивные и наиболее протяженные геохимические аномалии формируются в донных отложениях рек, которые сохраняются многие десятки (а возможно и сотни) лет после закрытия производств.

Заключение

Определение генезиса геохимических аномалий, установленных в ходе разведочных работ или эколого-геохимических исследований, требует знания природных особенностей данного района, специфики воздействия геологоразведки, горнорудной промышленности, сопутствующей хозяйственно-бытовой деятельности на состояние окружающей среды, проявляющихся в особенностях распределения и поведения химических элементов и их соединений в различных природных компонентах, прежде всего, в почвах и донных отложениях водных объектов, способных длительное время депонировать техногенное загрязнение.

В горнорудных районах техногенные геохимические аномалии, фиксируемые почвами и донными отложениями водотоков, обычно отличаются четко выраженным градиентом концентрации поллютантов от центра к периферии. Центральные части их приурочены к источнику загрязнения, где уровни содержания элементов в десятки и сотни раз выше фона. Их размеры обычно составляют первые кв. км, иногда больше. Менее контрастные аномалии могут занимать значительные по площади территории. Общий контур зоны воздействия горных работ на подстилающую поверхность в значительной степени определяется гидрометеорологической ситуацией (направлением, скоростью и частотой ветров). Зоны наиболее интенсивного воздействия связаны преимущественно со штилевыми условиями и периодами невысоких скоростей ветра, что обуславливает центральное положение источника загрязнения на площади выявленных аномалий. В горных условиях морфология аномалий во многом зависит от рельефа местности. Как правило, участки с наиболее контрастным накоплением элементов локализованы в пределах горно-долинных ландшафтов, где расположены источники воздействия.

По своим размерам, комплексности состава и интенсивности концентрирования химических элементов техногенные аномалии в подавляющем большинстве случаев превосходят природные аналоги. Интенсивность концентрирования химических элементов обычно суще-

ственно увеличивается в ряду воздействия: поисково-оценочные работы-разведка-добыча-обогащение-переработка руд, а также зависит от продолжительности функционирования горнорудных предприятий и объемов добываемых руд. Техногенное воздействие приводит к нарушению естественных ассоциаций химических элементов. В техногенных аномалиях ассоциируются элементы, не встречающиеся в аномальных количествах совместно или крайне редко объединяющиеся в ассоциации в рудогенных аномалиях. Относительные уровни концентрирования элементов-примесей в техногенных аномалиях очень часто многократно выше, нежели главных добываемых компонентов. Для техногенных аномалий характерно присутствие в повышенных концентрациях химических элементов, отличающихся малым кларком, высокой технофильностью, токсичностью или повышенной биоактивностью. Техногенное воздействие приводит к изменению баланса форм миграции и нахождения химических элементов, обусловленного увеличением доли их подвижных форм. В зонах техногенного загрязнения существенно меняется петрохимический и минеральный состав почв и донных отложений; заметные изменения наблюдаются также в составе их органического вещества. В поверхностных водотоках заметно преобладают химические элементы, мигрирующие во взвешенной форме, что связано как с возрастанием мутности вод, так и с увеличением концентраций элементов во взвеси.

Литература

1. Баранов Э.Н. Эндогенные геохимические ореолы колчеданных месторождений. – М.: Наука, 1987. – 296 с.
2. Вернадский В.И. Геохимия марганца в связи с учением о полезных ископаемых // Тр. Конференции по генезису руд железа, марганца и алюминия. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1937, с. 229-246.
3. Волох А.А., Колесов А.А., Чернова А.Е. Определение термоформ ртути методом атомной абсорбции // Геохимические исследования городских агломераций. – М., ИМГРЭ, 1998, с. 126-132.
4. Волох А.А., Янин Е.П. Выявление техногенных аномалий ртути в реках с использованием термического атомно-абсорбционного анализа // Ртуть. Проблемы геохимии, экологии, аналитики. – М.: ИМГРЭ, 2005, с. 126-133.
5. Волох А.А., Янин Е.П. Использование термического атомно-абсорбционного анализа для оценки техногенных аномалий ртути в реках // Прикладная геохимия. Вып. 4: Аналитические исследования. – М.: ИМГРЭ, 2003, с. 279-288.
6. Воробьев А.Е. Прогнозная карта горнопромышленного загрязнения территории России // Горн. инф.-анал. бюл., 1999, № 7, с. 204-205.
7. Габлина И.Ф. Кристаллохимическая перестройка сульфидов меди в условиях гипергенеза // Важнейшие промышленные типы россыпей и месторождений кор выветривания, технология оценки и освоения. – М.: ИГЕМ РАН, 1997, с. 64.
8. Геохимические барьеры в зоне гипергенеза. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 395 с.
9. Голева Г.А. Гидрогеохимические поиски скрытого оруденения. – М.: Недра, 1968.
10. Григорьев Н.П., Голембиевская Л.П., Елеева И.В. и др. Охрана окружающей среды при геологоразведочных работах. – М.: ВИЭМС, 1991. – 44 с.

11. Григорян С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведки рудных месторождений. – М.: Недра, 1987. – 408 с.
12. Григорян С.В., Морозов В.И. Вторичные литохимические ореолы при поисках скрытого оруденения. – М.: Наука, 1985. – 238 с.
13. Елпатьевский П.В., Аржанова В.С. Факторы формирования техногенных потоков рассеяния от горнопромышленных предприятий // Геохимия техногенеза: Тез. докл. 2 Всес. сов., Минск, 1991. – Минск, 1991, с. 80-82.
14. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. – Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1991. – 256 с.
15. Колотов Б.А. Гидрогеохимия рудных месторождений. – М.: Недра, 1992. –
16. Колотов Б.А. Прогноз экологической опасности при разработке рудных месторождений // Экология и экономика природопользования. Тез. докл. науч.-прак. конф. – М., 1995, с. 67-68.
17. Колотов Б.А., Крайнов С.Р., Рубейкин В.З. и др. Основы гидрогеохимических поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 199 с.
18. Ларинова О.И. Карта экологических условий освоения минерально-сырьевой базы России // Разведка и охрана недр, 1995, № 9, с. 27-28.
19. Левинсон А. Введение в поисковую геохимию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 499 с.
20. Медведева М.В., Германова Н.И. Биоиндикация аэротехногенного загрязнения почв бореальных лесов (на примере Костомушского ГОКа) // Всерос. сов. и выездная науч. сессия «Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия», Апатиты, 22-25 июня 1998: Тез. докл. – Апатиты, 1998, с. 215.
21. Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по вторичным ореолам рассеяния. – М.: ИМГРЭ, 1993. – 191 с.
22. Методические рекомендации по литохимическим методам поисков рудных месторождений по потокам рассеяния. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 164 с.
23. Мрня Ф. Геохимические поиски рудных месторождений методом донных осадков в Южной Чехии // Methods of geochemical prospecting. V. 1. Abstracts. Part II. – Praha, 1979, с. 144-146.
24. Назаров А.Г. Геохимия высокогорных ландшафтов. – М.: Наука, 1974. – 198 с.
25. Несвижская Н.И., Саит Ю.Е. Геохимические поиски перекрытых сульфидных месторождений по наложенным ореолам. – М.: ИМГРЭ, 1975. – 78 с.
26. Новокрещёнов А.П., Волох А.А. Возможности применения термоформ ртути в экологическом мониторинге // Эколого-геохимические проблемы ртути. – М.: ИМГРЭ, 2000, с. 125-129.
27. Овсянников В.М. Изотопные методы исследования антропогенного свинца // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзорная информация, 1998, № 11, с. 31-73.
28. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. – М.: Недра, 1990. – 247 с.
29. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрейя-2000, 1999. – 768 с.

30. *Поливанов В.С., Иванова А.И., Вавилова Г.В.* Особенности геохимического функционирования геосистем в связи с техногенезом // *Вопросы географии*, 1977, № 106, с. 97-104.
31. *Поликарпочкин В.В.* Геохимические поиски рудных месторождений по потокам рассеяния // *Советская геология*, 1962, № 4, с. 63-76.
32. *Поликарпочкин В.В.* Вторичные ореолы и потоки рассеяния. – Новосибирск: Наука, 1976. – 407 с.
33. *Разенкова Н.И., Волох А.А.* Виды и формы ртути в природных и антропогенных объектах // *Эколого-геохимические проблемы ртути*. – М.: ИМГРЭ, 2000, с. 99-108.
34. *Разенкова Н.И., Филиппова Т.В., Янин Е.П.* О формах нахождения тяжелых металлов в техногенном потоке // *Методы изучения техногенных геохимических аномалий*. – М.: ИМГРЭ, 1984, с. 66-69.
35. *Разенкова Н.И., Янин Е.П.* Трансформация состава органического вещества речных отложений в зоне техногенного воздействия // *Прикладная геохимия*. Вып. 6. Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья. – М.: ИМГРЭ, 2004, с. 221-226.
36. *Рудогенные геохимические аномалии*. – М.: Недра, 19882. – 208 с.
37. *Сает Ю.Е.* Антропогенные геохимические аномалии (особенности, методика изучения и экологическое значение): Автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук. – М., 1982. – 53 с.
38. *Сает Ю.Е.* Вторичные геохимические ореолы при поисках рудных месторождений. – М.: Наука, 1982. – 168 с.
39. *Сает Ю.Е.* Методические основы эколого-геохимических исследований при геологоразведочных работах // *Разведка и охрана недр*, 1986, № 5, с. 35-39.
40. *Сает Ю.Е., Онищенко Т.Л., Янин Е.П.* Методические рекомендации по геохимическим исследованиям для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых горнодобывающих предприятий. – М.: ИМГРЭ, 1987. – 100 с.
41. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
42. *Сает Ю.Е., Янин Е.П., Алексинская Л.Н.* Геохимические критерии различия рудных и антропогенных потоков рассеяния в поверхностных водотоках // *Гидрогеохимические методы поисков рудных месторождений и прогноза землетрясений*. – Новосибирск: Наука, 1983, с. 87-95.
43. *Сает Ю.Е., Янин Е.П.* Геохимические закономерности образования антропогенных потоков рассеяния химических элементов в малых реках // *Методы изучения техногенных геохимических аномалий*. – М.: ИМГРЭ, 1984, с. 31-44.
44. *Сает Ю.Е., Янин Е.П.* О комплексном составе техногенных гидрохимических аномалий // *Водные ресурсы*, 1991, № 2, с. 135-140.
45. *Сотников В.И.* Влияние рудных месторождений и их отработки на окружающую среду // *Соровский образовательный журнал*, 1997, № 5, с. 62-65.
46. *Табаксблат Л.С.* О специфике загрязнения окружающей среды в горнорудных районах // *Рациональное использование недр и охрана окружающей среды*. – СПб.: Горный институт, 1992, с. 93-97.
47. *Табаксблат Л.С.* Техногенное накопление металлов в ландшафтах рудных и угольных месторождений Урала // *Изв. РАН. Сер. геогр.*, 1993, № 3, с. 109-116.

48. *Табаксблат Л.С., Умаров М.У.* Содержание металлов в рудничных водосбросах как источника преобразования окружающей среды горнорудных районов // *Водные ресурсы*, 1991, № 2, с. 158-167.
49. *Таусон В.Л., Гелетий В.Ф., Меньшиков В.И.* Уровни содержания, характер распределения и формы нахождения ртути как индикаторы источников ртутного загрязнения природной среды // *Химия в интересах устойчивого развития*, 1995, №3, с. 151-159.
50. *Таусон В.Л., Зубков В.С., Меньшиков В.И.* Формы нахождения ртути в минералах рудной формаций // *Геология и геофизика*, 1994, т. 35, №1, с. 54-69.
51. *Таусон В.Л., Меньшиков В.И., Зубков В.С.* Использование термического атомно-абсорбционного анализа синтетических кристаллов для диагностики форм ртути в минералах // *Геохимия*, 1992, №8, с. 1203-1208.
52. *Таусон В.Л., Меньшиков В.И., Кондауров И.Г. и др.* Первый опыт применения сфалерит-галенитового геотермометра, основанного на межфазном распределении ртути // *Геохимия*, 1989, №12, с. 1788-1793.
53. *Требования к геохимическим работам при ГСР-50 с общими поисками.* – М.: ИМГРЭ, ВСЕГЕИ, 1990. – 128 с.
54. *Тюленева В.М., Сидоренко Г.А., Кривоконева Г.К. и др.* Минеральные формы токсикантов – важнейший критерий в выявлении признаков техногенного загрязнения потоков рассеяния // *Минералогические исследования в решении экологических проблем.* – М.: ИГЕМ РАН, 1998, с. 73-88.
55. *Тютюнова Ф.И., Пантелеев И.Я., Пантелева Т.И. и др.* Прогноз качества подземных вод в связи с их охраной от загрязнения. – М.: Наука, 1978. – 208 с.
56. *Филиппова Л.А., Григорян С.А.* Поиски по потокам рассеяния в районах горнорудной деятельности // *Methods of geochemical prospecting. V. 1. Abstracts. Part II.* – Praha, 1979, с. 123-124/
57. *Хокс Х.Е., Уэбб Дж.С.* Геохимические методы поисков минеральных месторождений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 487 с.
58. *Хоскинг К.Ф.Г.* Проблемы применения геохимических методов поисков в Корнуолле, Англия // *Геохимические поиски: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1974, с. 90-108.
59. *Хренов П.М., Синчук Ю.А., Кузнецов В.Г. и др.* Воздействие геологоразведочных и горнодобывающих работ на геологическую и окружающую среду. – М.: Геоинформмарк, 1992. – 46 с.
60. *Чумаченко А.М., Ананьев А.И., Голубкова И.Ф., Фомин И.А.* О радиоактивной загрязненности атмосферы рудников по добыче руд цветных и редких металлов // *Цветная металлургия*, 1992, № 2, с. 66-70.
61. *Янин Е.П.* Техногенные потоки рассеяния химических элементов в донных отложениях поверхностных водотоков // *Советская геология*, 1988. № 10, с. 101-109.
62. *Янин Е.П.* Экологическая геохимия горнопромышленных территорий. – М.: Геоинформмарк, 1993. – 50 с.
63. *Янин Е.П.* Введение в экологическую геохимию. – М.: ИМГРЭ, 1999. – 68 с.
64. *Янин Е.П.* Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). – М.: ИМГРЭ, 2002. – 52 с.

65. Янин Е.П. Эколого-геохимические аспекты аллювиального осадкообразования в городских агломерациях // Прикладная геохимия. Вып. 2. Экологическая геохимия. – М.: ИМГРЭ, 2001, с. 389-414.
66. Янин Е.П. Эпифитовзвесь – новый индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 51 с.
67. Янин Е.П. Химический состав и минералогические особенности техногенных речных илов // Прикладная геохимия. Вып. 6. Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья. – М.: ИМГРЭ, 2004, с. 195-221.
68. Янин Е.П. Источники и особенности загрязнения речных систем в горнорудных районах // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2005, № 1, с. 2-33.
69. Янин Е.П. Органические поллютанты в техногенных речных илах // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 2006, № 5, с. 2-26.
70. Янин Е.П. Роль техногенеза в формировании минерального состава речных отложений (на примере р. Пахры, Московская область) // Экологические системы и приборы, 2007, № 6.
71. Янин Е.П., Ахтямова Г.Г. Техногенные частицы и их роль в формировании вещественного состава современных речных отложений // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2007, № 1, с. 30-43.
72. Янин Е.П., Кашина Л.И., Тимошкин Г.А., Токарев И.В. Геохимические особенности потоков рассеяния химических элементов в горнодобывающих районах // Геохимия техногенеза, ч. II. – Иркутск, 1985, с. 108-111.
73. Янин Е.П., Тимошкин Г.А. Техногенные потоки рассеяния химических элементов в поверхностных водотоках горнопромышленных ландшафтов // Биогеохимические методы при изучении окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 1989, с. 37-44.
74. Abdel-Saheb J. A., Schwab A. P., Banks M. K. et al. Chemical characterization of heavy-metal contaminated soil transecto in Southeast Kansas // Amer. Soc. Agron. Annu. Meet., 1992, Minneapolis, 1992, p. 30.
75. Alan R. Introduction: Mining and metals in the environment // J. Geochem. Explor., 1997, 58, № 2-3, p. 95-100.
76. Butt C.R.M., Nichol I. The identification of various types of geochemical stream sediment anomalies in Northern Ireland // J. Geochem. Explor., 1979, 11, № 1, p. 13-32.
77. Chork 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.
78. Dinelli E., Morandi N., Tateo F. Fine-grained weathering products in waste disposal from two sulphide mines in the northern Apennines, Italy // Clay Miner., 1998, 33, № 3, p. 423-433.
79. Dold B., Fontboté L. A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfide tailings of Fe oxide Cu-As deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile // Chem. Geol., 2002, 189, № 3-4.
80. Feoktistov V. M., Lazareva I. P. Snow contamination caused by an ore-dressing mill // Vesi ja ymparistohallinnon julk. A., 1994, № 188, p. 51-61.
81. Förstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. – Berlin etc.: Springer-Verlag, 1979. – 486 p.
82. Foster P., Hunt D.T., Morris A.W. Metals in an acid mine stream and estuary // Sci. Total Environ., 1978, 9, № 1, 75-86.

83. *Hosking K.F.G., Pisarski J.B.* Geochemical surveys in Cornwall // *Mining Mag.*, 1965, 112, № 3, p. 179-322.
84. *Jennet J.C., Wixson B.G.* Geochemistry, mining and the environment // *Miner. and Environ.*, 1983, 5, № 2-3, p. 39-53.
85. *Johnson M., Roberts D., Firth N.* Lead and zinc in the terrestrial environment around derelict metalliferous mines in Wales // *Sci/ Total Environ.*, 1978, 10, № 1, p. 61-78.
86. *Karlsson S., Allard B., Hakasson K.* Chemical characterization of stream-bed sediments receiving high loadings of acid mine effluents // *Chem. Geol.*, 1988, 67, № 1-2, p. 1-15.
87. *Moriarty F., Bull K.P., Hanson H.M., Freestone P.* The distribution of lead, zinc and cadmium in sediments of an ore-enriched lotic ecosystem, the river Ecclesbourne, Derbyshire // *Environ. Pollut.*, 1982, B 4, № 1, p. 45-68.
88. *Rapant S., Cicmanová S., Dietzová Z. et al.* Medicínsko-geochemický výskum v oblasti Zlatej Idky // *Geol. Pr. St. geol. ust. Dionyza Stura. Bratislava*, 2004, № 110, s. 65-76.
89. *Roberts R.D., Johnson M.S.* Dispersal of heavy metals from abandoned mine workings and their transference through terrestrial food chain // *Environ. Pollut.*, 1978, 16, № 4, p. 293-308.
90. *Rose A.W.* Acid mine drainage geochemistry // *Earth and Miner. Sci.*, 1994, 63, № 3, p. 64.
91. *Sipilä P., Salminen R.* Environmental impact of some sulfide mines in Finland // *ICP Inf. Newslett.*, 1995, 21, № 1, p. 34-36.
92. *Tada F., Doi H., Kawaguchi N. et al.* // *Рикусуйгаку дзассиб* *Jap. J. Limnol.*, 1982, 43, № 4, p. 225-229.