



КРИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНАХ ОКИСЛЕНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР). Ч. 1. ОБЩИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ВЫВЕТРИВАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

В. А. Абрамова, А. Б. Птицын

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

Выполнен обзор исследований физико-химических закономерностей процессов выветривания в криолитозоне, в частности, некоторых криогеохимических особенностей процессов гипергенеза сульфидных месторождений и их влияния на развитие зон окисления. Установлено, что процессы химического взаимодействия в системе «вода – порода» в условиях многолетней мерзлоты принципиально отличаются от аналогичных процессов при положительных температурах. Такие факторы, как криогенное концентрирование растворов, криогенное растрескивание пород и руд при колебаниях температуры, особые свойства пленочной воды, наличие кислотных растворов способствуют существенному увеличению скорости химических реакций в криолитозоне и интенсифицируют процессы перевода ряда химических элементов (например, тяжелых металлов) в подвижное состояние. Данная тема весьма актуальна с точки зрения оценки негативного воздействия на окружающую среду при планируемой отработке ряда сульфидных месторождений Забайкалья и Прибайкалья (Удоканское медное, Озерное и Холоднинское полиметаллические и др.), поскольку грамотное решение актуальных поисково-оценочных и геоэкологических задач невозможно без изучения механизмов геолого-геохимических процессов в криолитозоне.

Ключевые слова: криогеохимия, зона окисления, сульфидные месторождения, многолетняя мерзлота, рудные минералы.

CRYOGEOCHEMICAL PROCESSES IN THE ZONES OF OXIDATION OF ORE DEPOSITS (ANALYTICAL REVIEW). PART 1. GENERAL PHYSICO-CHEMICAL REGULARITIES IN WEATHERING IN THE CRYOLITHIC ZONE

V. A. Abramova, A. B. Ptitsyn

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia

The authors have reviewed physicochemical regularities in weathering in the cryolithic zone, in particular, some cryogeochemical features of sulfide deposits hypergenesis and their impact on the development of oxidation zones. It was revealed that the chemical interaction in the water – rock system in the permafrost environment is principally different from the similar processes at a positive temperature. Such factors as cryogenic melt concentration, cryogenic rock and ore fracturing at varying temperature, special properties of film water, and presence of acid solutions further a substantial increase in the rate of chemical reactions in the cryolithic zone and intensify mobilisation of some chemical elements (e.g. heavy metals). The subject is very topical in terms of the evaluation of effects on the environment of the planned development of several sulfide deposits in Transbaikal and Cisbaikal regions (Udokanskoye copper deposit, Ozernoye and Kholodninskoye polymetallic deposits etc.), as the wise solution of topical prospecting, appraisal, and geological tasks is impossible without studying geological and geochemical processes in the cryolithic zone.

Keywords: cryogeochemistry, oxidation zone, sulfide deposits, permafrost, ore metals.

DOI 10.20403/2078-0575-2017-2-69-78

По современным представлениям, около 25 % площади всей суши земли и 64 % территории России занимают криогенные ландшафты. В криолитозоне России сосредоточено более 80 % разведанных в стране запасов черных, цветных, драгоценных металлов и других полезных ископаемых. В связи с этим в настоящее время, несомненно, продолжается интенсивное освоение минерально-сырьевых ресурсов зоны многолетней мерзлоты. Созданы и развиваются крупные горнопромышленные предприятия в Арктике, Якутии, Норильске, Воркуте, Забайкалье, на Кольском полуострове и Чукотке. Решаются инженерно-технические проблемы, связанные со строительством и эксплуатацией горно-

технических сооружений в зоне многолетней мерзлоты. Вместе с тем многие вопросы криогеохимии либо до сих пор остаются дискуссионными, либо пока и вовсе не имеют ответа.

Очерки об истории изучения криолитозоны достаточно подробно освещены в литературе [17, 23]. Первая информация о наблюдавшихся летом мерзлых породах стала появляться, по-видимому, лишь с XVI столетия [17]. С XVII по XIX в. сведения о существовании и распространении многолетнемерзлых пород (ММП) накапливали и отдельные путешественники, и целые экспедиции, чему способствовало развитие торгового капитала, а также общий подъем научной и практической деятельности. До

1960 г. считалось, что область многолетней мерзлоты является зоной химического покоя. Однако в последующие годы полевыми, экспериментальными и теоретическими исследованиями было установлено, что в криолитозоне достаточно активно проявляются процессы химического выветривания, миграции и переотложения вещества [10, 22, 29, 43, 44, 47, 55 и др.]. Обзор некоторых публикаций на эту тему дан в монографии А. Б. Птицына [31].

Формирование криолитозоны, судя по геологическим данным, началось примерно 2 млн лет назад, а сплошное устойчивое ее распространение – около 650 тыс. лет назад в пределах севера Сибирской платформы [14]. В строении криолитозоны выделяют мерзлые, морозные и охлажденные породы. Мерзлые породы характеризуются отрицательными температурами и содержат в своем составе лед. В морозных породах вода и лед отсутствуют, чаще всего они представлены сухими песками, галечниками, магматическими и метаморфическими их разновидностями. Охлажденные породы также имеют температуру ниже 0 °С и насыщены минерализованными солеными водами (криопэгами). Сверху над криолитозоной располагается слой сезонного промерзания и оттаивания мощностью от 0,5 до 6 м [22], который подвергается наиболее интенсивному преобразованию и изменению в приповерхностных условиях [29]. Данный процесс носит название гипергенеза (от греч. *hyper* – над, сверху, поверх и *genesis* – происхождение, образование) и происходит под влиянием экзогенных (физических, химических, биогенных) факторов [5, 11, 18, 28, 30, 40]. Термин введен знаменитым минералогом А. Е. Ферсманом. Гипергенные процессы проникают в глубь поверхностной части земной коры на сотни метров и даже несколько километров в сильно расчлененном горном рельефе, образуя довольно мощную зону гипергенеза. Причина гипергенных изменений минералов изверженных горных пород с точки зрения термодинамики заключается в избытке их свободной энергии по отношению к Р-Т условиям окружающей среды. Оказываясь в совершенно иных физико-химических условиях под влиянием различных внешних факторов, минералы изверженных пород замещаются гипергенными, а изверженные горные породы разрушаются, т.е. выветриваются [12].

Характер и интенсивность физико-химических изменений горных пород контролируются климатом, тектоникой (рельефом), биологическими особенностями (растительный покров, почвенные микроорганизмы), составом исходных пород, их генезисом и структурой [11, 49]. В зависимости от преобладания того или иного физико-географического и физико-химического фактора выделяют два взаимосвязанных типа выветривания: физическое и химическое.

К факторам *физического* выветривания следует относить колебания температуры, различия коэффициентов объемного расширения минера-

лов и физическое воздействие воды в условиях ее периодического замерзания – оттаивания в трещинах и порах горных пород [12]. Так, наиболее существенным физическим фактором, вызывающим дезинтеграцию горных пород, являются суточные и сезонные колебания температур. Они приводят к нагреванию и охлаждению поверхности горных пород, в результате чего по причине разного коэффициента теплового расширения и сжатия между минералами возникают напряжения и, как следствие, происходят разрушение минеральных зерен и образование обломков разных размеров (глыбы, щебень, песок, алевриты). Цвет горных пород также влияет на интенсивность температурного выветривания: темноцветные минералы нагреваются и остывают быстрее и больше, чем бесцветные. Когда поверхность горных пород нагревается сильнее внутренних частей, то наблюдается шелушение и отслаивание чешуй и пластин различной толщины. Данный процесс особенно хорошо выражен на отдельных глыбах или валунах.

При механическом выветривании значительным разрушающим фактором становится периодически замерзающая вода, такие процессы носят название морозного выветривания. С наступлением отрицательных температур, находящаяся в трещинах и порах вода начинает замерзать, увеличиваясь при этом в объеме почти на 10 % и оказывая давление на стенки трещин. Дезинтеграции горных пород также способствует наличие водяного пара и незамерзающих тонких водных пленок, адсорбированных на поверхности минеральных частиц [43]. При понижении температуры толщина этих пленок возрастает и влечет за собой понижение прочности твердых тел вследствие уменьшения их поверхностной энергии и, соответственно, более интенсивное их выщелачивание из-за увеличения реакционной поверхности за счет колебаний температуры [32]. Количество незамерзающей воды с увеличением дисперсности грунта повышается за счет пленочной влаги.

Образующиеся в процессе физического выветривания измельченные продукты могут оставаться на месте, тем самым создавая элювиальные породы, или перемещаться вниз по склонам возвышенностей и гор, смываться поверхностными водами и удаляться ветром и льдом [14]. Таким образом, в ландшафтах криолитозоны из-за действия физического фактора происходит не только разрушение горных пород, но и формирование своеобразных криогенных форм рельефа – морозобойных трещин, термокарстовых форм, бугров пучения, булгуных, гидролакколитов, наледей, курумов, солифлюкционных террас и языков.

Большое значение в разрушении горных пород в приповерхностных условиях имеет *химическое* выветривание. Основную роль в этом процессе играют вода, кислород, углекислота и органические кислоты, содержащиеся в воздухе и воде. Главными



факторами химических реакций в зоне гипергенеза являются температура, водородный показатель pH, окислительный потенциал Eh, образование коллоидов и живое вещество биосферы. Процессы химического выветривания представлены растворением, окислением, восстановлением, гидратацией, гидролизом и карбонатизацией [2, 15].

Бактерии, водоросли, лишайники, мхи и грибы также принимают активное участие в химическом выветривании, поселяясь на поверхности горных пород и извлекая из нее необходимые для жизни химические элементы (P, S, K, Ca, Mg, Na, B, Sr, Fe, Si, Al). На 1 г выветрелой породы может приходиться до 1 млн бактерий. Микробиота способна как разрушать, так и создавать минералы (фосфаты, карбонаты, сульфаты, сульфиды, оксиды, силикаты) [9]. Известно, что некоторые сообщества микроорганизмов (психрофилы) приспособлены к жизни в условиях холода и могут нормально существовать при температуре до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [50]. Психрофилы широко распространены в природе, поскольку они формируют постоянную микрофлору регионов с многолетней мерзлотой, полярных регионов и океанов [8, 35]. Приспособление к понижению температуры у данных организмов связывают с изменением состава мембран (в нем повышается содержание ненасыщенных жирных кислот) и со способностью к образованию криопротекторов (например, глицерола). Другой механизм связан с накоплением в клетках больших количеств наиболее важных ферментов, поэтому даже при неоптимальной температуре их функционирование позволяет клетке поддерживать достаточную активность [7]. Установлено, что при пониженных температурах у психрофилов снижается не только скорость роста, но и скорость отмирания, и соответственно, увеличивается возможность их выживания. Таким образом, можно утверждать, что в условиях мерзлотных ландшафтов выживают организмы, наиболее энергетически выгодные с точки зрения адаптации [41]. Действительная роль микроорганизмов в криогеохимических процессах изучена еще явно недостаточно.

Особую проблему представляют процессы миграции и концентрирования химических элементов в мерзлотных ландшафтах. Полевые исследования показывают, что подвижность Na, Ca, Zn, Co в зоне мерзлоты ниже, чем в теплом климате, а Bi, Co, Sb, As, Tl, Hg, Ag, Cr, Be, Au, W, наоборот, выше [20]. Экспериментальные работы свидетельствуют, что в условиях отрицательных температур подвижность Cu, Ag, Pb, Al, P, Ti и Zr выше, а Ca, Mn, Y, Cr, Co, Ni, Sr, K, Na ниже, чем при положительных температурах [51].

Ряды подвижности многих химических элементов в криолитозоне также заметно отличаются в зависимости от геологической обстановки [19]. По данным гидрогеохимических исследований в условиях многолетней мерзлоты установлен ряд геохимической подвижности элементов (в порядке

возрастания): Ti – Ni – Be – V – Mo – Fe – Mn – Cr – Pb – Co – Sn – Ba – Ca – Cu – (As, Ag) – Mg – Na – Zn – Sb [47]. Определенную информацию о подвижности химических элементов в сезонно-талом слое несут данные об их ореолах рассеяния: широкие ореолы (сотни метров) вокруг рудных тел жильной формы отмечены для Mn, Cr, Ni, Zn, Mo, Ag, Pb; более узкие (до 30–40 м) характерны для Ba, As, Au, Sn, W [29]. Результаты, полученные по этому вопросу разными авторами, несколько расходятся, поскольку объекты исследований заметно различались.

Миграция металлов в криолитозоне происходит в поверхностных водотоках (при положительной температуре) и в толще мерзлых пород (при отрицательной температуре). Металлы могут переноситься водными потоками механически в виде взвеси, в коллоидной форме и в виде истинных растворов. В истинных растворах металлы переносятся в виде как простых, так и наиболее устойчивых в данных условиях комплексных ионов [31]. Роль механического переноса весьма значительна для Ti, Al, Fe, Si, Ni, Cr, Mn, менее – для Cu, Co, Ga, Ba, Sr, Y, B, V [20]. Золото в условиях криолитозоны может переноситься и в истинных растворах [54], и в коллоидной [42] и биогенной формах [41]. Также экспериментально доказано, что в мерзлых толщах и снежном покрове Au мигрирует в незамерзающих водах за счет их диффузии [36].

Миграция влаги в криогенных условиях может быть вызвана самыми различными причинами, подробное обобщение которых представлено в наших работах [4, 31]. В основном миграция влаги в мерзлых грунтах происходит по границам минеральных фаз со льдом и межзерновому пространству льда в виде концентрированных растворов или пара [1, 45]. Так, гравитационной миграцией незамерзающих водных растворов криолитозоны можно объяснить образование в широком диапазоне температур (от -1 до $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже) внутри- и подмерзлотных скоплений высокоминерализованных рассолов (10–300 г/л), которые, медленно мигрируя сквозь мерзлую, содержащую лед породу, скапливаются на водоупорном горизонте, например глинистом [17]. Процесс разделения подземных вод на пресные или слабосоленые льды и подмерзлотные высокоминерализованные воды в результате промерзания происходит согласно общеизвестным закономерностям криогенного концентрирования [17]. В то же время при кристаллизации часть солей включается в лед как в виде твердых примесей, так и в ионной форме, а другая часть отжимается в нижележащие слои, где осуществляется криогенное концентрирование раствора. Количество вовлеченных в лед солей контролируется их содержанием в оставшемся растворе, составом пород, интенсивностью водообмена и скоростью образования льда [25]. Растворы с высокой минерализацией находятся в равновесии со льдом, кристаллическими фазами и жидкими включениями. Большое количество ионных соединений

кристаллизуются из переохлажденных растворов в форме кристаллогидратов [40]. При последующем оттаивании льда выпавшие соли не переходят в раствор полностью, вследствие чего минерализация жидкой фазы и ее качественный состав изменяются по сравнению с исходным раствором. Результатом этих процессов является криогенное опреснение природного раствора и образование ниже современной подошвы мерзлых пород так называемой зоны опреснения, которая глубже резко переходит в зону концентрирования, соответствующую глубине максимального промерзания в прошлые более холодные времена. Ниже располагаются не измененные криогенезом подземные воды [25].

В том случае, когда земная поверхность не изолирована слабопроницаемым покровом и имеется возможность испарения, восходящая миграция влаги из нижних горизонтов вверх за счет капиллярных сил преобладает над нисходящей гравитационной миграцией. В результате на земной поверхности образуются выцветы солей и типичные солончаки, характерные как для аридного, так и для холодного климата [31, 48]. Как правило, наиболее интенсивные солевые выпотевания приурочены к зонам тектонических нарушений (разломам, системам трещиноватости) и образуют иногда сплошные налеты толщиной 10–15 см на площади до сотен квадратных метров [13]. Существует мнение, что отложение солей при отрицательных температурах можно считать разновидностью галогенеза [33].

Изложенное позволяет сделать вывод, что геохимические особенности процессов выветривания, протекающие в гипергенных условиях зоны криогенеза, во многом схожи с таковыми для аридного климата. Это подтверждается образованием выцветов водорастворимых солей на земной поверхности, засолением надмерзлотных вод и повышенной минерализацией поровых растворов. Различия проявляются в интенсивности (скорости) геохимических процессов и существенном отличии подвижности многих химических элементов в теплом климате и в условиях мерзлоты.

Рассмотренные механизмы миграции влаги работают и при формировании зон окисления сульфидных месторождений, расположенных в зоне криогенеза и выходящих на дневную поверхность, поскольку рудные выходы любого месторождения в той или иной степени затронуты процессами выветривания [12, 29, 49, 56, 57, 61, 62]. Специфические особенности кор выветривания в пределах месторождений заключаются в широком распространении участков и зон, обогащенных рудными элементами и содержащих аномально высокие их концентрации [24]. Поэтому коры выветривания и зоны окисления месторождений полезных ископаемых совмещены [53]. Следует отметить, что в отличие от процессов выветривания горных пород процессы окисления сульфидов протекают намного быстрее [51]. Эти особенности позволяют, используя

широко распространенные в корях выветривания слоистые силикаты (сметиты, иллиты, минералы группы каолинита и др.), выявлять первичную природу руд и вмещающих горных пород, а также реконструировать палеогеографические обстановки условий гипергенеза и последовательность их смен во времени и пространстве [24, 53].

Особенности развития зональности и стадийности зон окисления сульфидных месторождений подробно рассмотрены академиком С. С. Смирновым [39]. Он отмечал, что для зоны окисления сульфидных месторождений характерна резко выраженная вертикальная зональность. Самая верхняя зона является зоной полного окисления, ниже располагается зона выщелачивания, которая обычно представлена осветленными породами, испытавшими на себе воздействие кислотных водных растворов. Далее следуют подзона богатых окисленных руд, окисленный верх зоны цементации, зона вторичного сульфидного обогащения (зона цементации) и зона первичных руд. В развитии зоны окисления С. С. Смирнов также выделяет три стадии: начальную (изменение эндогенных сульфидов), срединную (обилие сульфатов и присутствие сульфидов) и конечную (отсутствие сульфидов, уменьшение количества сульфатов и развитие карбонатов).

К настоящему времени особенности зон окисления в ММП подробно изучены на месторождениях меди (Удоканское, Бурпалинское, Чинейское в Кодаро-Удоканской зоне), золота (Советское, Олимпиадинское в Енисейском кряже; Караль-Веемское на Западной Чукотке; Ирокиндинское в Северо-Западном Забайкалье; Токурское в Селенджинской зоне Среднего Приамурья), золота и сурьмы (Сарылахское на р. Верхняя Индигирка) и на месторождениях малоглубинной золотосеребряной формации (Карамкенское и Дукатское) [52].

Существуют разные взгляды на происхождение зон окисления сульфидных месторождений, залегающих в пределах криолитозоны [10, 20, 52]. Сторонники одной из теорий полагают, что в условиях криолитозоны окисленные руды представляют собой законсервированные реликты древних кор выветривания, формировавшихся от палеозоя до эпохи четвертичного оледенения [16]. Процессы минералообразования в них заторможены, формирование глубоких зон окисления происходило при положительной температуре. Другие исследователи, признающие доледниковое происхождение зон окисления, считают возможным окисление сульфидов при отрицательной температуре.

Согласно третьей точке зрения, зоны окисления сульфидных месторождений в условиях криогенеза – продукт современных гипергенных процессов, протекающих при отрицательных температурах [26, 34, 55]. По этой теории образование зон окисления происходит в два этапа – докриогенный и криогенный. На первом формируются зоны окисления с обычными минеральным составом и зонально-

стью, а на втором – преимущественно сульфатные и сульфатно-окисидные. Большинство исследователей поддерживают последнюю точку зрения, поскольку характерной чертой данных зон окисления является обилие сульфатов – устойчивых продуктов криоминералогенеза. Образование сульфатов отмечено и на больших глубинах: в сильно трещиноватых породах глубина зоны окисления может достигать 300–500 м и более [18]. Это приводит к развитию еще недостаточно изученных вторичных сульфатных зон обогащения руд в полях развития кор выветривания и зон окисления в многолетней мерзлоте [53].

Значительным фактором в интенсификации процессов при пониженных температурах может служить экзотермичность реакций окисления сульфидов в ММП. Как известно, все реакции окисления сульфидов идут с выделением больших количеств тепла, что приводит к появлению талой воды в толще криолитозоны и повышению температур в горных выработках (до 300 °С и выше) с обильным выделением удушливых газов (SO_2 , SO_3 , H_2S) [31, 38, 46, 53, 61]. Термохимические расчеты для реакций, сопровождающих окисление сульфидных руд в многолетней мерзлоте, показывают, что многие из них могут протекать самопроизвольно [3, 10, 39]. Подобные экзотермические эффекты свойственны также реакциям образования большинства кристаллогидратных соединений. Как следствие, в многолетней мерзлоте возможно формирование тепловых аномалий и образование таликов [28].

Указанные процессы приводят к созданию оптимальных условий для биоокисления сульфидов меди, свинца, цинка и других металлов мезофильными микроорганизмами (тионовыми бактериями, особенно вида *Thiobacillus ferrooxidans*), которые обычно присутствуют в отвалах пустых пород и дренажных водах, увеличивая скорость окисления сульфидов почти в 10 раз [57, 58, 64].

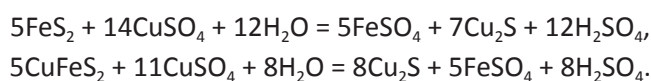
На основании микробиологических работ составлен следующий ряд минералов, поддающихся бактериальному окислению под действием *Thiobacillus ferrooxidans*: пирит (FeS_2), марказит (FeS_2), пирротин (FeS), халькопирит (CuFeS_2), борнит (Cu_5FeS_4), ковеллин (CuS), халькозин (Cu_2S), тетраэдрит ($3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$), молибденит (MoS_2). Считается, что данные микроорганизмы оптимально развиваются при pH 2–4, а при pH 4,5 их развитие прекращается [37].

В окислении сульфидных минералов тяжелых металлов в зоне гипергенеза участвуют также ионы Fe^{3+} , образующиеся при окислении пирита. Сернокислородное окисное железо – сильнейший окислитель других сульфидов, и потому халькозин, сфалерит и галенит могут окисляться с образованием серной кислоты и растворимых сульфатов меди и цинка и малорастворимого сульфата свинца [60]. Образующиеся гидраты окиси железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ труднорастворимы и выпадают в осадок, образуя при этом специфические коры выветривания – железистые корки (так называемые рудные шляпы). Скорость

окисления сульфидов убывает в ряду сфалерит (ZnS) – пирротин (Fe_{1-n}S) – халькопирит (CuFeS_2) – пирит (FeS_2) – галенит (PbS) – аргентит (Ag_2S) [12].

Обогащенные металлами кислотные растворы просачиваются в более глубокие горизонты, активно реагируя с рудами и вмещающими породами. Наиболее концентрированные растворы (pH 1–0,46) образуются при окислении колчеданных руд [49, 63]. В тех участках зоны окисления, где в породах присутствуют карбонаты, происходят нейтрализация растворов и образование карбонатных форм минералов [31].

В качестве природного химического окислителя наряду с кислородом и Fe^{3+} могут выступать ионы двухвалентной меди. Их действие на сульфиды протекает по следующим схемам [6]:



Такого рода реакции получают широкое развитие лишь в зоне вторичного сульфидного обогащения, но в ограниченном масштабе имеют место и в зоне окисления [39, 59]. Зона вторичного сульфидного обогащения (зона цементации) месторождений характеризуется самыми богатыми рудами, а ее мощность зависит от мощности зоны гипергенеза. Ниже зоны вторичного обогащения концентрации металлов меньше и отражают их уровень в первичных сульфидных рудах [49].

По мнению некоторых исследователей [38, 56], при окислении сульфидов определенную роль может играть озон, образующийся эпизодически в период грозных дождей и обладающий более высокой, чем кислород, окисляющей способностью и высокой растворимостью в воде.

Значительное влияние на процессы окисления и выщелачивания сульфидных минералов могут оказывать содержащиеся в кислотных дождях оксиды азота и продукты их взаимодействия с водой [21], что особенно сильно проявляется в области отрицательных температур [27]. В настоящее время криогеохимические процессы с участием соединений азота в зоне гипергенеза практически не изучены и их вклад в ускорение реакций окисления при выветривании минералов во внимание не принимается.

Таким образом, вся совокупность полевых, экспериментальных и теоретических исследований убедительно доказывает, что гипергенные преобразования в зонах окисления сульфидных месторождений достаточно интенсивны и при отрицательных температурах. Благодаря наличию жидкой водной фазы, существование которой обеспечивается действием двух факторов – криогенным концентрированием растворов и влиянием поверхностной энергии минеральных частиц, толща ММП является зоной активного криогенного выветривания. Это определяет специфику минерального состава, характер миграции и отложения рудных элементов, последовательность минералообразования

и формирования вертикальной зональности зоны окисления сульфидных месторождений в условиях многолетней мерзлоты.

Окисление сульфидных минералов в зонах выходов пород и руд на земную поверхность представляет собой комплекс химических и биохимических процессов. Заметное влияние на химическое преобразование приповерхностных частей криолитозоны и возможность реализации окислительных условий для активного выщелачивания сульфидов оказывают соединения азота, речь о которых пойдет во второй части данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ананян А. А.** Перемещение влаги в мерзлых рыхлых горных породах под влиянием сил электроосмоса // Коллоид. журн. – 1952. – Т. 14. – С. 173–176.
2. **Войткевич В. А., Закруткин В. В.** Основы геохимии. – М.: Высшая школа, 1976. – 367 с.
3. **Гаррелс Р. М.** Минеральные равновесия. – М.: ИЛ, 1962. – 306 с.
4. **Геохимия** криогенных зон окисления / А. Б. Птицын, В. А. Абрамова, Т. И. Маркович, Е. С. Эпова. – Новосибирск: Наука, 2009. – 88 с.
5. **Гинзбург И. И.** Основные вопросы образования кор выветривания и их значение при поисках минеральных месторождений // Геология рудных месторождений. – 1963. – № 5. – С. 21–36.
6. **Годовиков А. А.** Минералогия. – М.: Недра, 1975. – 520 с.
7. **Ермилова Е. В.** Молекулярные аспекты адаптации прокариот. – СПб.: Изд-во ун-та, 2007. – 179 с.
8. **Жизнеспособные** простейшие в вечной мерзлоте Арктики / А. В. Шатилов, Л. А. Шмакова, С. В. Губин, Д. А. Гиличинский // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV, № 2. – С. 69–78.
9. **Заварзин Г. А.** Микробиология как центральная биологическая дисциплина // Природа. – 2012. – № 1. – С. 100–107.
10. **Иванов О. П.** Основные факторы развития зон окисления сульфидных месторождений в условиях многолетней мерзлоты // Геохимия. – 1966. – № 9. – С. 1095–1106.
11. **Кашик А. С.** Формирование минеральной зональности в корах выветривания. – Новосибирск: Наука, 1989. – 161 с.
12. **Козлов В. Д.** Введение в геохимию: учеб. пособие для геологических специальностей вузов. – Иркутск: Изд-во гос. техн. ун-та, 2005. – 176 с.
13. **Кокин А. В.** Бериллий в сульфатах криолитозоны Южного Верхоянья // Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 267, № 5. – С. 1229–1230.
14. **Короновский Н. В.** Общая геология. – М.: КДУ, 2010. – 526 с.
15. **Короновский Н. В., Ясаманов Н. А.** Геология. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 448 с.
16. **Кренделев Ф. П., Бакун Н. Н., Володин Р. Н.** Медистые песчаники Удокана. – М.: Наука, 1983. – 248 с.
17. **Кудрявцев В. А.** Общее мерзлотоведение. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.
18. **Лукашев К. И.** Геохимические процессы миграции и концентрации элементов в биосфере. – Минск: Изд-во Белгосуниверситета, 1957. – 219 с.
19. **Макаров В. Н.** Миграция микроэлементов в водах основных геохимических ландшафтов северо-востока Якутии // Взаимосвязь поверхностных и подземных вод мерзлой зоны. – Якутск: ИМ СО АН СССР, 1980. – С. 114–127.
20. **Макаров В. Н.** Подвижность химических элементов в криолитозоне. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 50–61.
21. **Маркович Т. И., Птицын А. Б.** Неконтролируемое кислотное выщелачивание тяжелых металлов из сульфидных отвалов // Химия в интересах устойчивого развития. – 1998. – № 5. – С. 349–354.
22. **Некрасов И. А., Климовский И. В.** Вечная мерзлота зоны БАМ. – Новосибирск: Наука, 1978. – 120 с.
23. **Общее** мерзлотоведение / М. И. Сумгин, С. П. Качурин, Н. И. Толстухин, В. Ф. Тумель. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1940. – 237 с.
24. **Основные** аспекты учения о рудоносных корах выветривания в XXI веке / Н. С. Бортников, Ю. Ю. Бугельский, А. Д. Слукин и др. // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 6. – С. 491–505.
25. **Основы** гидрогеологии. Гидрогеохимия / С. Л. Шварцев, Е. В. Пиннекер, В. И. Перельман и др. – Новосибирск: Наука, 1982. – 284 с.
26. **Особенности** геологии и вопросы генезиса Удоканского месторождения медистых песчаников / Л. Ф. Наркелю, Ю. П. Безродных, А. И. Трубачев, Г. А. Юргенсон // Геология некоторых месторождений Забайкалья. – Чита, 1968. – С. 70–90.
27. **Павлюкова В. А., Маркович Т. И.** Геохимические процессы в криогенных зонах окисления сульфидных месторождений с участием соединений азота // Химия в интересах устойчивого развития. – 2006. – Т. 14, № 1. – С. 89–93.
28. **Перельман А. И.** Геохимия элементов в зоне гипергенеза. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
29. **Питулько В. М.** Влияние криогенеза на формирование вторичных геохимических полей месторождений полезных ископаемых // Миграция химических элементов в криогенезе / под ред. В. Н. Макарова. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 21–40.
30. **Полынов Б. Б.** Избранные труды. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 256 с.
31. **Птицын А. Б.** Геохимические основы геотехнологии металлов в условиях мерзлоты. – Новосибирск: Наука, 1992. – 120 с.
32. **Птицын А. Б.** Геохимия биосферы: учеб. пособие. – Новосибирск: НГУ, 2013. – 238 с.
33. **Птицын А. Б.** Теоретическая геохимия. – Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2006. – 180 с.
34. **Птицын А. Б., Сысоева Е. И.** Криогенный механизм образования зоны окисления Удокана



(по экспериментальным данным) // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36, № 3. – С. 90–97.

35. **Распределение** микроорганизмов в мерзлых грунтах / В. П. Мельников, В. В. Рогов, А. Н. Курчатова и др. // Криосфера Земли. – 2011. – Т. XV, № 4. – С. 86–90.

36. **Рудные** элементы в водах зоны гипергенеза месторождений Забайкалья / Ю. Ф. Погребняк, Л. А. Кондратенко, Т. Г. Лапердина и др. – Новосибирск: Наука, 1989. – 203 с.

37. **Самарина В. С.** Гидрогеохимия: учеб. пособие. – Л.: Изд-во ун-та, 1977. – 360 с.

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

39. **Смирнов С. С.** Зона окисления сульфидных месторождений. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 332 с.

40. **Сонненфелд П.** Рассолы и эвапориты: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 480 с.

41. **Тайсаев Т. Т.** Явление криобиогенеза и самоорганизация мерзлотных и геохимических ландшафтов // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 1. – С. 20–24.

42. **Тайсаев Т. Т., Плюснин А. М.** Особенности миграции золота в высокогорных гольцовых ландшафтах криолитозоны // Миграция химических элементов в криолитозоне. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 61–70.

43. **Тютюнов И. А.** Процессы изменения и преобразования почв и горных пород при отрицательной температуре. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 143 с.

44. **Ушборн А. Л.** Мир холода. – М.: Прогресс, 1988. – 380 с.

45. **Цытович Н. А.** К теории равновесного состояния воды в мерзлых грунтах // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. – 1945. – № 5/6. – С. 493–502.

46. **Шасткевич Ю. Г.** Многолетнемерзлые породы высокогорной части хребта Удокан и условия формирования их температурного режима // Гео-криологические условия Забайкальского Севера. – М.: Наука, 1966. – С. 24–44.

47. **Шварцев С. Л.** Некоторые результаты гидрохимических исследований в условиях многолетней мерзлоты // Геология рудных месторождений. – 1963. – № 2. – С. 100–110.

48. **Швецов П. Ф.** Криогенные геохимические поля на территории многолетней криолитозоны // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1961. – № 1. – С. 46–51.

49. **Щербина В. В.** Основы геохимии. – М.: Недра, 1972. – 296 с.

50. **Экология** микроорганизмов экстремальных водных систем: учеб. пособие / Б. Б. Намсараев, Е. Ю. Абидуева, Е. В. Лаврентьева и др. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2008. – 94 с.

51. **Эпова Е. С.** Геоэкологические аспекты поведения химических элементов в условиях криогенной зоны окисления на примере Удоканского месторождения (Восточное Забайкалье): автореф. дис. ... к. г.-м. н. – Томск, 2014. – 20 с.

52. **Юргенсон Г. А.** Зона окисления в многолетнемерзлых породах // Зап. ВМО. – 1997. – № 5. – С. 15–27.

53. **Юргенсон Г. А.** О некоторых общих проблемах минералогии и геохимии ландшафта исторических горнорудных территорий // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: тр. I Всерос. симп. с междунар. участием и VII Всерос. чтений памяти акад. А. Е. Ферсмана. – Чита, 2006. – 180 с.

54. **Юргенсон Г. А.** Особенности формирования зоны окисления в условиях многолетнемерзлых пород // Проблемы рудообразования, поисков и оценки минерального сырья. – Новосибирск: Наука, 1996. – С. 52–57.

55. **Юргенсон Г. А., Смирнова Н. Г., Каренина Л. А.** Об особенностях минералогии зоны окисления Удоканского месторождения меди // Вестн. науч. инф. Забайкальского филиала Геогр. об-ва СССР. – 1968. – № 9. – С. 3–10.

56. **Яхонтова Л. К., Грудев А. П.** Зона гипергенеза рудных месторождений. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 229 с.

57. **Яхонтова Л. К., Зверева В. П.** Основы минералогии гипергенеза: учеб. пособие. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 336 с.

58. **Blowes D. W., Jamborg J. L.** The pore-water geochemistry and mineralogy of sulfide tailings, Waite Amulet, Quebec, Canada // Applied Geochemistry. – 1990. – Vol. 5. – P. 327–346.

59. **Borman R. S., Watson D. M.** Chemical processes in abounded sulfide tailings dumps and environmental implications for Norhearsten New Brunswick // Canadian Inst. Mining Metall. Bull. – 1976. – Vol. 69. – P. 86–96.

60. **Crace B.** Problems on the revegetation of mine spoil dumps // Sulphur in Australia / Ed. J.R. Freney, A.J. Nicolson. – Canberra: Austral. Acad. Sci., 1980. – P. 256–264.

61. **Kelly B. C., Tuovinen O. H.** Microbial oxidation of minerals in mine tailings // Chemistry and biology of solid waste. – Berlin: Springer, 1988. – P. 33–53.

62. **Nordstrom D. K.** Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals // Acid sulfate weathering. – 1982. – Vol. 3. – P. 37–39.

63. **Nordstrom D. K.** Chemical modeling of acid mine waters in the Western United States // Meeting Proceedings USGS Water Resources Investigations Report no. 91. – 1991. – 4034. – P. 534–538.

64. **Silver M., Torma A. E.** Oxidation of metal sulfides by Thiobacillus ferrooxidans grown in different substrates // Canad. J. Microbiol. – 1974. – Vol. 20, No. 2. – P. 141–147.

REFERENCES

1. Ananyan A.A. [Moisture movement in frozen and loose rocks under electroosmotic effect]. *Kolloidny Zhurnal – Colloid Journal*, 1952, vol. 14, pp. 173–176. (In Russ.).



2. Voytkovich V.A., Zakrutkin V.V. *Osnovy geokhimi* [The basics of geochemistry]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1976. 367 p. (In Russ.).
3. Garrels R.M. *Mineral'nye ravnovesiya* [Mineral equilibria]. Moscow, Inostrannaya Literatura Publ., 1962. 306 p. (In Russ.).
4. Ptitsyn A.B., Abramova V.A., Markovich T.I., Epova E.S. *Geokhimiya kriegennykh zon okisleniya* [Geochemistry of cryogenic oxidation zones]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 88 p. (In Russ.).
5. Ginzburg I.I. [Major issues of weathering crust formation and their role in searching for mineral deposits]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of ore deposits*, 1963, no. 5, pp. 21–36. (In Russ.).
6. Godovikov A.A. *Mineralogiya* [Mineralogy]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 520 p. (In Russ.).
7. Ermilova E.V. *Molekulyarnye aspekty adaptatsii prokariot* [Molecular aspects of prokaryotic adaptation]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2007. 179 p. (In Russ.).
8. Shatilovich A.V., Shmakova L.A., Gubin S.V., Gili-chinskiy D.A. [Revivable protozoans in the permafrost of the Arctic regions]. *Kriosfera Zemli – Cryosphere of the Earth*, 2010, vol. XIV, no. 2, pp. 69–78. (In Russ.).
9. Zavarzin G.A. [Microbiology as a central biological discipline]. *Priroda – Nature*, 2012, no. 1, pp. 100–107. (In Russ.).
10. Ivanov O.P. [Basic factors of the development of sulphide deposit oxidation zones under permafrost conditions]. *Geokhimiya – Geochemistry*, 1966, no. 9, pp. 1095–1106. (In Russ.).
11. Kashik A.S. *Formirovanie mineral'noy zonal'nosti v korakh vyvetrivaniya* [The formation of mineral zoning in weathering crusts]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 161 p. (In Russ.).
12. Kozlov V.D. *Vvedenie v geokhimiya: ucheb. posobie dlya geologicheskikh spetsial'nostey vuzov* [Introduction to geochemistry. A study guide for university students majoring in geology]. Irkutsk, Irkutsk State Technical University Publ., 2005. 176 p. (In Russ.).
13. Kokin A.V. [Beryllium in sulfates of the cryolithic zone of the southern Upper Yana region]. *Dokl. AN SSSR – Reports of AS USSR*, 1982, vol. 267, no. 5, pp. 1229–1230. (In Russ.).
14. Koronovskiy N.V. *Obshchaya geologiya* [General geology]. 2nd edition. Moscow, KDU Publ., 2010. 526 p. (In Russ.).
15. Koronovskiy N.V., Yasamanov N.A. *Geologiya* [Geology]. Moscow, Akademiya Publishing Centre, 2003. 448 p. (In Russ.).
16. Krendeleev F.P., Bakun N.N., Volodin R.N. *Medistye peschaniki Udokana* [Copper sandstones of the Udokanskoye deposit]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 248 p.
17. Kudryavtsev V.A. *Obshchee merzlotovedenie* [General permafrost study]. Moscow, MSU Publ., 1978. 464 p. (In Russ.).
18. Lukashev K.I. *Geokhimicheskie protsessy migratsii i kontsentratsii elementov v biosfere* [Geochemical processes of migration and concentration of elements in the biosphere]. Minsk, V.I. Lenin Belorussian State University Publ., 1957. 219 p. (In Russ.).
19. Makarov V.N. [Migration of microelements in the water of major geochemical landscapes of the northeastern Yakutia]. *Vzaimosvyaz' poverkhnostnykh i podzemnykh vod merzloy zony* [The interrelation of surface and subsurface water in the permafrost zone]. Yakutsk, IM SB AS USSR Publ., 1980, pp. 114–127. (In Russ.).
20. Makarov V.N. *Podvizhnost' khimicheskikh elementov v kriolitozone* [The mobility of chemical elements in the cryolithic zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, pp. 50–61. (In Russ.).
21. Markovich T.I., Ptitsyn A.B. [Uncontrollable acid leaching of heavy metals from sulphide barrows]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya – Chemistry in the Promotion of Sustainable Development*, 1998, no. 5, pp. 349–354. (In Russ.).
22. Nekrasov I.A., Klimovsky I.V. *Vechnaya merzlotaya zony BAM* [Permafrost in the BAM zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978. 120 p. (In Russ.).
23. Sumgin M.I., Kachurin S.P., Tolstikhin N.I., Tumel V.F. *Obshchee merzlotovedenie* [General permafrost study]. Moscow, Leningrad, AS USSR Publ., 1940. 237 p. (In Russ.).
24. Shvartsev S.L., Pinnecker E.V., Perelman V.I., et al. *Osnovy gidrogeologii. Gidrogeokhimiya* [Basics of hydrogeology. Hydrogeochemistry]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 284 p. (In Russ.).
25. Bortnikov N.S., Bugelskiy Yu.Yu., Slukin A.D., Novikov V.M., Piloyan G.O. [Major aspects of studying ore-bearing weathering crusts in the 21st century]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of Ore Deposits*, 2011, vol. 53, no. 6, pp. 491–505. (In Russ.).
26. Narkelyun L.F., Bezrodnikh Yu.P., Trubachev A.I., Yurgenson G.A. [Geological features and genesis of the Udokanskoye copper sandstone deposit]. *Geologiya nekotorykh mestorozhdeniy Zabaykal'ya* [Geology of some deposits in Transbaikalia]. Chita, 1968, pp. 70–90. (In Russ.).
27. Pavlyukova V.A., Markovich T.I. [Geochemical processes in cryolithic zones of oxidation of sulphide deposits with the involvement of nitrogen compounds]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya – Chemistry in the Promotion of Sustainable Development*, 2006, vol. 14, no. 1, pp. 89–93. (In Russ.).
28. Perelman A.I. *Geokhimiya elementov v zone gipergeneza* [Geochemistry of elements in gypogenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 288 p. (In Russ.).
29. Pitulko V.M. [The impact of cryogenesis on the formation of secondary geochemical fields of mineral deposits]. *Migratsiya khimicheskikh elementov v kriogeneze* [Migration of chemical elements in cryogenesis]. Makarov V.N. ed. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, pp. 21–40. (In Russ.).
30. Polynov B.B. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow, AS USSR Publ., 1956. 256 p. (In Russ.).



31. Ptitsyn A.B. *Geokhimicheskie osnovy geotekhnologii metallov v usloviyakh merzloty* [Geochemical basics of metals geotechnology under permafrost conditions]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 120 p. (In Russ.).
32. Ptitsyn A.B. *Geokhimiya biosfery: Ucheb. Posobie* [Biosphere geochemistry. A study guide]. Novosibirsk, NSU Publ., 2013. 238 p. (In Russ.).
33. Ptitsyn A.B. *Teoreticheskaya geokhimiya* [Theoretical geochemistry]. Novosibirsk, Geo Academic Publishing, 2006. 180 p. (In Russ.).
34. Ptitsyn A.B., Sysoeva E.I. [Cryogenic mechanism of formation of the oxidation zone in the Udokanskoye deposit (from experimental findings)]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 1995, vol. 36, no. 3, pp. 90–97. (In Russ.).
35. Melnikov V.P., Rogov V.V., Kurchatova A.N., Brushkov A.V., Griva G.I. [Distribution of microorganisms in frozen subsoils]. *Kriosfera Zemli – Cryosphere of the Earth*, 2011, vol. XV, no. 4, pp. 86–90. (In Russ.).
36. Pogrebnyak Yu.F., Kondratenko L.A., Laperdina T.G., et al. *Rudnye elementy v vodakh zony gipergeneza mestorozhdeniy Zabaykal'ya* [Ore elements in water in the hypergenesis zone of Transbaikalian deposits]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 203 p. (In Russ.).
37. Samarina V.S. *Gidrogeokhimiya*. [Hydrogeochemistry. A study guide]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1977. 360 p. (In Russ.).
38. Saukov A.A. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 480 p. (In Russ.).
39. Smirnov S.S. *Zona okisleniya sul'fidnykh mestorozhdeniy* [Oxidation zone of sulphide deposits]. Moscow, AS USSR Publ., 1955. 332 p. (In Russ.).
40. Sonnenfeld P. *Rassoly i evapority: Per. s angl.* [Brines and evaporites: translated from English]. Moscow, Mir Publ., 1988. 480 p. (In Russ.).
41. Taysaev T.T. [Cryobiogenesis and self-organising frozen and geochemical landscapes]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya – Latest Developments in Natural Science*, 2004, no. 1, pp. 20–24. (In Russ.).
42. Taysaev T.T., Plyusnin A.M. [The features of gold migration in the cryolithic zones of bald mountains]. *Migratsiya khimicheskikh elementov v kriolitovuyu zonu* [Migration of chemical elements in cryolithic zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, pp. 61–70. (In Russ.).
43. Tyutyunov I.A. *Protsessy izmeneniya i preobrazovaniya pochv i gornykh porod pri otritsatel'noy temperature* [Alteration and transformation of soils and rocks at a negative temperature]. Moscow, AS USSR Publ., 1960. 143 p.
44. Ushborne A.L. *Mir kholoda* [The frozen world]. Moscow, Progress Publ., 1988. 380 p. (In Russ.).
45. Tsytoich N.A. [The theory of water equilibrium in frozen subsoils]. *Izv. AN SSSR, ser. geogr. i geofiz. – Bulletin of AS USSR. Geography and Geophysics*, 1945, no. 5/6, pp. 493–502. (In Russ.).
46. Shastkevich Yu.G. [Permafrost rocks of the high mountain region of the Udokan range]. *Geokriologicheskie usloviya Zabaykal'skogo Severa* [Geocryological conditions in the north of Transbaikalia]. Moscow, Nauka Publ., 1966, pp. 24–44. (In Russ.).
47. Shvartsev S.L. [Some findings of hydrochemical studies under permafrost conditions]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of Ore Deposits*, 1963, no. 2, pp. 100–110. (In Russ.).
48. Shvetsov P.F. [Cryogenic geochemical fields within a permafrost zone]. *Izv. AN SSSR, ser. geol. – Bulletin of AS USSR. Geology*, 1961, no. 1, pp. 46–51. (In Russ.).
49. Shcherbina V.V. *Osnovy geokhimii* [Basics of geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 296 p. (In Russ.).
50. Namsaraev B.B., Abidueva E.Yu., Lavrentyeva E.V., et al. *Ekologiya mikroorganizmov ekstremal'nykh vodnykh sistem: ucheb. posobie* [The ecology of microorganisms in extremal water systems. A study guide]. Ulan-Ude, Buryat State University Publ., 2008. 94 p. (In Russ.).
51. Epova E.S. *Geoekologicheskie aspekty povedeniya khimicheskikh elementov v usloviyakh kriegennykh zony okisleniya na primere Udokanskogo mestorozhdeniya (Vostochnoe Zabaykal'e)* [Geochemical patterns of chemical elements behaviour in an oxidation cryogenic zone. A case study from the Udokanskoye deposit]. Author's abstract of PhD thesis. Tomsk, 2014. 20 p. (In Russ.).
52. Yurgenson G.A. [Oxidation zone in permafrost rocks]. *Zap. VMO – Bulletin of the All-Union Mineralogical Society*, 1997, no. 5, pp. 15–27. (In Russ.).
53. Yurgenson G.A. [Some general problems of mineralogy and geochemistry of the landscapes of historical ore mining territories]. *Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnykh territoriy. Sovremennoye mineraloobrazovanie: Trudy I Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i VII Vserossiyskikh chteniyakh pamyati akad. A.E. Fersmana 7–10 noyabrya 2006 g.* [Mineralogy and geochemistry of ore mining territories. Current mineralization. Proceedings of the 1st All-Russia Readings in memory of A.E. Fersman, 7–10 November 2006]. Chita, 2006, p. 180. (In Russ.).
54. Yurgenson G.A. [Characteristic features of oxidation zone formation in permafrost rocks]. *Problemy rudoobrazovaniya, poiskov i otsenki mineral'nogo syr'ya* [Issues of mineralization, prospecting for and appraisal of mineral deposits]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996, pp. 52–57. (In Russ.).
55. Yurgenson G.A., Smirnova N.G., Karenina L.A. [Mineralogical features of the oxidation zone of the Udokanskoye copper deposit]. *Vestn. nauchn. inf-tsiy Zab. f-lu Geogr. Ob-va SSSR – Bulletin of the Transbaikalian Branch of the Geographical Society of the USSR*, 1968, no. 9, pp. 3–10. (In Russ.).
56. Yakhontova L.K., Grudev A.P. *Zona gipergeneza rudnykh mestorozhdeniy* [Zone of ore deposits hypergenesis]. Moscow, MSU Publ., 1978. 229 p. (In Russ.).



57. Yakhontova L.K., Zvereva V.P. *Osnovy mineralogii gipergeneza: ucheb. posobie* [Basics of hypergenesis mineralogy. A study guide]. Vladivostok, Dalnauka, 2000. 336 p. (In Russ.).
58. Blowes D. W., Jamborg J. L. The pore-water geochemistry and mineralogy of sulfide tailings, Waite Amulet, Quebec, Canada. *Applied Geochemistry*, 1990, vol. 5, pp. 327–346.
59. Borman R. S., Watson D. M. Chemical processes in abounded sulfide tailings dumps and environmental implications for Norhearsten New Brunswick. *Canadian Inst. Mining Metall. Bull.*, 1976, vol. 69, pp. 86–96.
60. Crase B. Problems on the revegetation of mine spoil dumps. *Sulphur in Australia* / Ed. J.R. Freney, A.J.Nicolson. Canberra, Austral. Acad. Sci., 1980, pp. 256–264.
61. Kelly B. C., Tuovinen O. H. Microbial oxidation of minerals in mine tailings. *Chemistry and biology of solid waste*. Berlin, Springer, 1988, pp. 33–53.
62. Nordstrom D. K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *Acid sulfate weathering*, 1982, vol. 3, pp. 37–39.
63. Nordstrom D. K. Chemical modeling of acid mine waters in the Western United States. *Meeting Proceedings USGS Water Resources Investigations Report № 91*, 1991, 4034, pp. 534–538.
64. Silver M., Torma A. E. Oxidation of metal sulfides by *Thiobacillus ferrooxidans* grown in different substrates. *Canad. J. Microbiol.*, 1974, vol. 20, no. 2, pp. 141–147.

© В. А. Абрамова, А. Б. Птицын, 2017