

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.41; 504.06; 550.84; 004.942

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИОГЕННОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ СУЛЬФИДОВ В ЗОНЕ УДОКАНСКОГО РУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В. А. Абрамова¹, А. В. Паршин², А. Е. Будяк², А. Б. Птицын¹

¹Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
E-mail: vera_abramova79@mail.ru, ул. Недорезова, 16а, 672014, г. Чита, Россия
²Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, E-mail: sarhin@geo.istu.edu,
ул. Фаворского, 1А, а/я 9, 664033, г. Иркутск, Россия

Представлена геоинформационная технология, разработанная на основе результатов экспериментального и компьютерного физико-химического моделирования и обеспечивающая количественный расчет и картографирование последствий геохимических процессов в отвалах сульфидных месторождений на примере Удоканского медного месторождения. Отмечена роль азота как компонента кислотных дождей и его влияние на процессы химического выветривания сульфидов. Изложены результаты модельных расчетов и экспериментальных исследований по окислительному выщелачиванию сульфидных удоканских руд с участием соединений азота. Проведено сравнение результатов классического и геоинформационного подходов к расчету потоков рассеяния, что имеет определяющее значение при решении поисковых и геоэкологических задач в криолитозоне. Полученные выводы об интенсификации процессов окисления сульфидов в условиях мерзлоты позволяют дать оценку возможного воздействия планируемой отработки месторождения Удокан на окружающую среду и могут быть использованы для совершенствования криогеотехнологических методов добычи металлов.

Кодаро-Удоканская зона, сульфидные месторождения, соединения азота, многолетняя мерзлота, поток рассеяния, подвижность элементов, физико-химическое моделирование, эксперимент, геоинформационные технологии, криогеотехнология

Современные геолого-геохимические исследования, направленные на поиски и добычу минерально-сырьевых ресурсов, связаны с интенсивным освоением зоны многолетней мерзлоты, в которой сосредоточено более 80 % разведанных в России запасов черных, цветных, драгоценных металлов и других полезных ископаемых. Одним из наиболее крупных и перспективных по запасам минерального сырья является Кодаро-Удоканский рудный район, расположенный на севере Восточного Забайкалья.

На этой территории находится треть по величине в мире по запасам меди Удоканское месторождение, ресурсный потенциал которого оценивается более чем 27 млн т [1]. Месторождение Удокан открыто в 1949 г. [2]. Проблеме освоения Удокана посвящено более тысячи публикаций, и она до сих пор привлекает внимание многих специалистов.

Сложный и уникальный проект освоения Удоканского месторождения включен в Стратегию развития металлургической промышленности России на период до 2020 г., а также в Стратегию социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 г. [3]. По современным оценкам, общий объем инвестиций в развитие месторождения Удокан составит 238 млрд руб. [1]. Ожидается, что успешная реализация проекта в сложных природно-климатических условиях создаст предпосылки для рационального освоения ресурсного потенциала Северного Забайкалья на базе единого комплекса объектов энергетической, транспортной, социальной и инженерной инфраструктуры и уже в среднесрочной перспективе позволит начать разработку 17 месторождений твердых полезных ископаемых на этой территории [1].

По данным [4], в общей сложности в рудах месторождений медистых песчаников Кодаро-Удоканской зоны установлено свыше 40 химических элементов с широким диапазоном их разброса по количеству и качеству, многие, из которых имеют важное промышленное значение. По мнению [5], ожидаемое освоение новых объектов в Забайкалье позволит России удовлетворить внутренние потребности по объемам производства меди и войти в число лидеров мирового рынка.

В связи с предполагаемой активизацией горнодобывающей промышленности в регионе, можно ожидать обострения проблем геозоологического характера, а также возникает необходимость прогнозировать воздействие на окружающую среду вводимых в разработку месторождений уже на предпроектной стадии. Серьезную экологическую опасность будут представлять отходы горнорудной промышленности вследствие активных процессов гипергенного преобразования в них сульфидных минералов, зачастую хранящихся в течение длительного времени без соблюдения соответствующих норм и правил и подвергающихся постоянному воздействию агентов выветривания [6–11].

Скорость процессов окисления сульфидов и состав образующихся при этом растворов определяется множеством факторов, среди которых выделяются кислотные атмосферные выпадения [6, 12], возрастающая кислотообразующая роль азота и его соединений [13], особенно в зоне многолетней мерзлоты [14–16]. В результате создаются условия для высокой подвижности тяжелых металлов и других элементов, что необходимо учитывать как при изучении механизмов криогеохимических процессов, так и при решении актуальных геолого-геохимических задач при поиске и добыче минерально-сырьевых ресурсов, сосредоточенных в криолитозоне [17].

Решение этих задач осуществляется путем сочетания полевых работ и экологических изысканий в районах месторождений, экспериментальных исследований геолого-геохимических процессов и широким применением методов компьютерного термодинамического моделирования, которые в комплексе позволяют получить более полную характеристику современного состояния природной среды и оценить ее ожидаемые экологические изменения. Возникает потребность в создании и совершенствовании экономичных и эффективных механизмов геозоологического мониторинга и прогнозирования, которые должны быть построены с учетом выявленных региональных и локальных особенностей изучаемой территории.

Традиционным способом обеспечения геозоологического мониторинга в настоящее время являются геоинформационные системы (ГИС), которые эффективно обеспечивают процессы сбора, хранения, обработки, накопления и представления геозоологической информации. Объединяя геоинформационные системы с указанными выше методами исследований, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки, появится возможность представления информации в картографическом виде, что позволит решать прогнозные задачи различного характера с достаточной высокой достоверностью [18]. Цель данной работы — разработка ГИС-технологии, основанной на результатах физико-химического и экспериментального моделирования, про-

гнозирование и картографирование результатов геолого-геохимических процессов на примере криогенного выветривания сульфидных минералов с участием соединений азота в зонах горнопромышленных разработок сульфидных месторождений.

Моделирование криогеохимических процессов проводили на образцах сульфидной руды Удоканского месторождения. Зона многолетней мерзлоты на Удокане имеет практически сплошное распространение мощностью от 65 м под водотоками и до 950 м под водоразделами. Температура мерзлых пород от -7 до -8°C , мощность активного слоя ~ 1 м, зона годовых колебаний температуры 20–30 м [2].

Минеральный состав руд месторождения достаточно разнообразен и представлен силикатами, сульфидами, карбонатами, сульфатами, оксидами и самородными элементами. Первичные руды — сульфидные. Из рудных минералов преобладают борнит (Cu_5FeS_4) и халькозин (Cu_2S). Халькопирит (CuFeS_2) присутствует в подчиненных количествах [2]. Основным полезным компонентом руд месторождения Удокан является медь. Согласно данным 2015 г., его балансовые запасы категорий В + С1 составляют 16.864 млн т меди; категории С2 — 3.232 млн т меди и 17.119 тыс. т серебра; забалансовые запасы категорий С1 + С2 — 0.953 млн т меди и 1.012 тыс. т серебра [1].

Разработка Удоканского месторождения будет проводиться открытым способом. В настоящее время предварительно определены места расположения хозяйственных объектов, хвостохранилища и отвалов [3].

Отметим, что одна из ключевых экологических проблем региона в течение многих лет связана с загрязнением воздушного бассейна. Атмосферный воздух на территории по своим метеорологическим и климатическим показателям имеет большую предрасположенность к загрязнению (повторяемость застоев воздуха 84 %, приземных инверсий 97 %) [19]. Данные многолетнего мониторинга показали, что среди основных загрязнителей преобладают соединения азота в виде диоксида (NO_2) и пыль [20]. Строительство карьеров и освоение месторождения значительно увеличат загрязнение воздушного бассейна за счет буровзрывных работ, транспорта, выбросов предприятия, проведения горнотехнических и технологических работ [19]. По данным [21], только прогнозируемая Удоканская ТЭЦ ежедневно будет выбрасывать в атмосферу до 130 т окиси углерода, 80 т двуокиси азота, 50 т сернистого газа и 30 т золы, которые будут способствовать ухудшению качества воздуха и изменению геохимического фона всего региона.

Для изучения процессов криогенного выветривания сульфидных руд Удокана с учетом влияния азота атмосферных осадков был апробирован метод физико-химического моделирования (ФХМ) в программном комплексе “Селектор” [22]. Метод позволяет исследовать преобразование веществ с помощью физико-химических моделей в условиях низких температур [23] и в достаточно короткие сроки получить информацию о вероятных вариантах развития геохимических процессов.

При использовании классической технологии ФХМ невозможно представить результаты расчетов в виде схемы или карты в соответствии с установленными требованиями, а также учесть динамику процессов. Тем не менее, расчет химического равновесного состава на базе модельной системы при положительных (293–298 К) и отрицательных (253 ± 0.5 К) температурах позволил определить основные формы миграции химических элементов, условия их образования и состав ожидаемых вторичных гипергенных минералов.

По результатам моделирования установлено, что в криогенных условиях в присутствии соединений азота происходит интенсивный (в 2.8–5.3 раза) процесс перехода меди в раствор [14]. Для исследования кинетики процесса окисления сульфидов и выполнения прогнозного расчета в некоторые периоды времени проведены лабораторные эксперименты по выщелачиванию ме-

ди из сульфидной руды серноазотистокислыми растворами. Эксперименты показали: максимальная концентрация меди в растворе (до 24 мг/л) при отрицательной температуре достигается в течение первых суток. Полученные данные продемонстрировали хорошую сходимость с данными физико-химического моделирования и полевыми исследованиями [14–16].

Для обеспечения картографирования результатов термодинамических расчетов с учетом лабораторных экспериментов использованы методические и технические возможности открытых геоинформационных технологий, основанные на согласовании форматов расчета среды ПК “Селектор” с пространственными базами данных PostgreSQL/PostGIS и последующим картографированием в Quantum GIS. Необходимые условия для геоинформационных расчетов применительно к территории Удоканского месторождения определены в соответствии с проектом освоения месторождения [3], в частности с учетом пространственных характеристик отвалов и хвостохранилищ.

Данными для геоинформационного проекта послужили результаты химического анализа руд Удоканского месторождения, глобальные цифровые покрытия SRTM, геологические карты geolkart.ru, данные дистанционного зондирования Landsat 8, топографические карты loadmap.net и опубликованная информация о климатической и метеорологической характеристиках территории.

Традиционные мониторинговые исследования включают измерения качества среды по сети точек. В нашем случае известны данные по форме и местоположению будущих источников загрязнений (отвалов и хвостов), а также результаты физико-химического моделирования процессов выветривания сульфидов, происходящих в них [15].

Для картирования предполагаемых концентраций меди в первую очередь необходимо вычислить количество вещества, выделяющегося из складированных пород и руд в течение определенного отрезка времени. Далее предстояло распределить полученные результаты на гидрологическую сеть рассматриваемой территории. Существует несколько вариантов решения данной задачи, одним из которых является расчет потока или ореола рассеяния и его классификация в соответствии с общепринятыми предельно допустимыми концентрациями (ПДК) или же региональным геохимическим фоном [24].

Наблюдения за гидрологической обстановкой на отдельных реках рассматриваемой территории проводились начиная с 1935 г. Выполненный расчет позволил в значительной степени судить о допустимости применения универсальных подходов к прогнозированию качества среды с региональными геохимическими особенностями, а также показал необходимость разработки принципиально иной технологии.

Основные методические положения использованной классической методики расчета потока рассеяния сводились к следующему [24]:

— определялся гидрометрический створ (или створы). По гидрометрическим данным с пункта исследуемой территории рассчитывался годовой вынос вещества в целом и ежегодный слой денудации для оценки техногенной нагрузки на уровни содержания меди в воде, взвешях и донных отложениях. Наблюдения проводились на гидрологической станции, расположенной на р. Нижний Ингамакит в 0.5 км ниже устья ручья Эмегачи (в дальнейшем именуется “станция Эмегачи”);

— вычислялась величина ежегодного слоя денудации в бассейне реки. При этом использовались литературные данные по плотности стекаемого вещества и по количеству вещества, транспортируемого по дну рек;

— обрабатывались данные по содержанию меди в воде и во взвешях для расчетов коэффициента ее водной миграции;

— вычислялось возможное содержание меди во взвесах и в воде по гидрометрическому створу; осуществлялся расчет площадей карьеров, хвостов, отвалов и объем годового сноса материала.

На основе анализа методики и результатов расчетов предложено усовершенствовать ее на принципе современного геоинформационного подхода, превосходящего классический как по детальности, так и по уровню соответствия реальной обстановке. Повышенная детальность достигнута за счет замены в расчете гидрометрической информации на метеорологическую (среднегодовое или сезонное количество атмосферных осадков) и морфологическую (площадь векторного слоя водосборов для конкретного отвала и водотока).

Достоверность расчетов обеспечивалась заменой универсальных констант выщелачивания меди на удельное количество вещества, получаемое из отвалов определенной массы и химических кондиций по результатам физико-химического моделирования. Кроме того, применение геоинформационных технологий позволило автоматизировать расчет ряда необходимых позиций, например площади водосборов. Исходя из этого, предложен новый подход к прогнозированию и картированию результатов геохимических процессов, основные методические позиции которого приведены ниже:

— формируется геоинформационный проект, включающий цифровую модель рельефа, детальную гидросеть, полученную по данным дистанционного зондирования, пространственные модели хозяйственных объектов на месторождении. В векторном слое гидросети каждый отрезок между пересечениями водотоков являлся отдельным объектом. Полигональные объекты хвостохранилища и отвалов в атрибутах содержат информацию о химико-аналитических параметрах каменного материала и о его предполагаемом количестве;

— с применением модулей ГИС SAGA, интегрированных в QuantumGIS (или вручную), по цифровой модели строились области водосборов, где будут расположены отвалы, и каждый отрезок гидросети. Вычислялись площади водосборов и на основе данных о среднегодовом количестве осадков выполнялся расчет количества воды на каждую область;

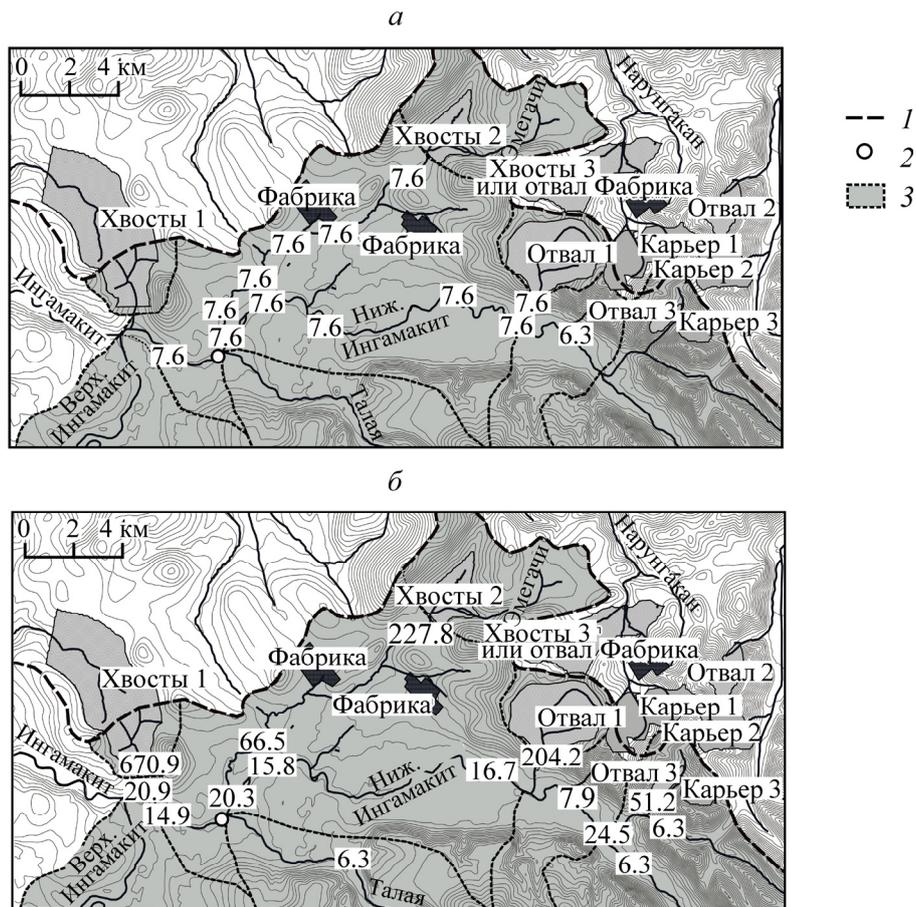
— проектные данные о кондициях и характеристиках каменного материала в отвалах, а также количестве и концентрации выщелачивающих растворов, позволил методом ФХМ вычислить концентрацию меди в водотоках, дренирующих в отвалы. Модельный расчет выполнен для периода первого года отработки месторождения. Поскольку метод ФХМ не позволяет реконструировать процесс водотока во времени, использованы результаты экспериментальных исследований о кинетике процесса выщелачивания;

— концентрация меди в каждом следующем отрезке графа гидросети вычислялась с учетом соотношений площадей водосборов, приходящихся на каждый из двух участков, сходящихся в точке водотоков. Это допущение принято исходя из необходимости детализации распределения нагрузки на небольшие водотоки по сравнению с классическим расчетом, а также с учетом того, что в данном регионе небольшие горные реки имеют преимущественно атмосферное питание. Возможность такого подхода подтверждается методической рекомендацией [25];

— вычислялась среднегодовая концентрация меди в каждом отрезке графа гидросети, что позволило установить распределение концентраций металла по площади.

Таким образом, “классическим” и “геоинформационным” способами (рисунок) рассчитаны и картированы возможные среднегодовые концентрации меди в водотоках в районе месторождения Удокан в первый год его разработки [3].

Согласно данным, полученным по классической методике, за год в р. Нижний Ингамакит поступит 312.48 кг меди и ее содержание в воде составит 1.28 мкг/л. Такая концентрация металла определена для станции Эмегачи и присвоена всему вышерасположенному графу гидросети.



Моделирование среднегодовой концентрации меди в водотоках в районе месторождения Удокан на основе: *а* — классической методики расчетов потока рассеяния; *б* — геоинформационного подхода; 1 — граница бассейна р. Нижний Ингамакит; 2 — гидрометрическая станция Эмегачи; 3 — границы водосборов

Очевидно, что на небольших расстояниях (порядка первых километров) в таких водотоках, как ручей Эмегачи, содержание меди в воде в десятки и сотни раз выше приведенного расчетного значения и будет зависеть от сезонных колебаний стока воды. Однако картографическое построение и классические расчеты не отражают реально наблюдаемых повышенных концентраций меди в штольневых водах (до 15 мг/л) Удоканского месторождения [2], что соответствует проведенным расчетам и экспериментам (концентрации меди в растворе достигают 24 мг/л) [14–16].

Геоинформационный подход обеспечивает бóльшую детальность расчетов, поскольку прогнозная концентрация металла присваивается каждому отрезку гидросети. Согласно рис. 2, в районе гидрометрической станции Эмегачи прогнозная среднегодовая концентрация меди превышает показатели классического расчета примерно в 2.5 раза (14.9 мкг/л).

После впадения в р. Нижний Ингамакит ручья, дренирующего из хвостохранилища, концентрация металла на небольшом участке водотока повышается до 20.9 мкг/л, но уже через несколько километров содержание меди в воде приближается к фоновому значению, верхний предел которого ограничивается 6.3 мкг/л [2].

Полученные результаты качественно и количественно согласуются с реальной гидрогеохимической обстановкой на Удоканском рудном поле [2]. По данным геоинформационного расчета, диапазоны концентраций меди в водах отвалов достигают миллиграммов, в водотоках, вытекающих из отвалов, — сотен микрограмм, но спустя первые километры падают до значе-

ний, близких к фоновым. В пределах лицензионной площади месторождения концентрации меди в воде ручьев, дренирующих из отвалов и хвостохранилищ, могут значительно превышать ПДК. Это вероятно обусловлено достаточно протяженным выходом рудного горизонта и дополнительным поступлением меди из обломков руды по руслам водотоков. Резкое падение концентраций меди может происходить при локальном рудном источнике [2]. В целом, сравнение методов расчета концентрации меди в водотоках (рисунок) показало, что в условиях криолитозоны классический подход занижает вероятное содержание металла по сравнению с геоинформационным.

ВЫВОДЫ

Применение геоинформационных технологий при изучении процессов выветривания сульфидных минералов в криолитозоне позволяет обеспечить не только картографическое представление результатов, но и предложить прогнозную оценку техногенной нагрузки на окружающую среду в зонах горнопромышленных разработок сульфидных месторождений. Согласно результатам физико-химического моделирования и экспериментальных исследований, воздействие возможных атмосферных азотсодержащих осадков на процесс окисления сульфидов в период обработки Удоканского месторождения повлечет за собой в составе кислых рудничных вод миграцию высоких концентраций не только меди, но и других рудных элементов, что приведет к дополнительному отрицательному воздействию на состояние поверхностных водотоков. Однако реальные загрязнения медью природных вод в районе месторождения, по-видимому, будут ниже вследствие высокой карбонатности пород и процессов вторичного минералообразования.

Предложенная методика расчета потоков рассеяния представляет экономичный способ оценки возможных последствий развития горнорудной промышленности и может применяться на первых стадиях геологических и эколого-геохимических исследований с учетом геохимической и морфологической обстановки изучаемого региона. Основой для разработки способов управления техногенными потоками химических элементов в условиях многолетней мерзлоты послужат установленные специфические особенности криогеохимических систем. Полученные выводы могут быть распространены как на природные объекты (колчеданные, полиметаллические и другие сульфидные месторождения), так и “старые” горнорудные регионы России, на территории которых за многие годы накоплены большие объемы отвального рудного сырья, для переработки которого применимы геотехнологические методы добычи металлов (в частности, кучное выщелачивание) способствующие снижению техногенной нагрузки на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Официальный сайт** Байкальской Горной Компании. URL: <http://www.bgk-udokan.ru/> (дата обращения: 15.02.2017).
2. **Птицын А. Б., Замана Л. В., Юргенсон Г. А. и др.** Удокан: геология, рудогенез, условия освоения. — Новосибирск: Наука, 2003. — 160 с.
3. **Отчет** о предварительной экологической и социальной оценке проекта Удокан [Электронный ресурс]. 2010. Режим доступа: URL: <http://www.bgk-udokan.ru/Socialresponsibility> (дата обращения: 24.04.2014).
4. **Трубачев А. И., Секисов А. Г., Салихов В. С., Манзырев Д. В.** Полезные компоненты в рудах медистых песчаников Кодаро-Удоканской зоны (Восточное Забайкалье) и технологии их извлечения // Изв. Сиб. отд. Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. — 2016. — № 1 (54). — С. 9–19.
5. **Опарин В. Н., Фрейдин А. М., Тапсиев А. П., Филиппов П. А.** Состояние и проблемы минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых России // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 173–181.

6. **Чантурия В. А., Макаров В. Н., Макаров Д. В.** Инженерная экология: особенности гипергенных процессов в заскладированных горнопромышленных отходах // Инж. экология. — 1999. — № 4. — С. 2–7.
7. **Бортникова С. Б., Гаськова О. Л., Бессонова Е. П.** Геохимия техногенных систем. — Новосибирск: Гео, 2006. — 169 с.
8. **Макаров Д. В., Мазухина С. И., Нестерова А. А., Нестеров Д. П., Маслобоев В. А.** Экспериментальное исследование и термодинамическое моделирование гипергенных процессов в хвостах обогащения медно-никелевых руд // Минералогия техногенеза. — Миасс: ИМин УрО РАН, 2007. — С. 146–164.
9. **Зверева В. П.** Экологические последствия гипергенных процессов на оловорудных месторождениях Дальнего Востока: — Владивосток: Дальнаука, 2008. — 165 с.
10. **Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В.** Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 138–153.
11. **Грехнев Н. И., Липина Л. Н.** Особенности геомеханических реакций окисления в зоне гипергенеза в климатических условиях юга Дальнего востока // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 183–188.
12. **Маркович Т. И., Птицын А. Б.** Неконтролируемое кислотное выщелачивание тяжелых металлов из сульфидных отвалов // Химия в интересах устойчивого развития. — 1998. — № 5. — С. 349–354.
13. **Graedel T. E., Benkovitz C. M., Keene W. L.** Global emission inventories of acid – related compounds, Water, Air, Soil Pollut., 1995, Vol. 85. — P. 25–36.
14. **Абрамова В. А.** Геоинформационное и физико-химическое моделирование геолого-геохимических процессов на сульфидных месторождениях в криолитозоне: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Иркутск, 2015. — 25 с.
15. **Абрамова В. А., Паршин А. В., Будяк А. Е.** Физико-химическое моделирование влияния соединений азота на протекание геохимических процессов в криолитозоне // Криосфера Земли. — 2015. — Т. IX. — № 3. — С. 32–37.
16. **Птицын А. Б., Маркович Т. И., Павлюкова В. А., Эпова Е. С.** Геохимия криогенных зон окисления. — Новосибирск: Наука, 2009. — 88 с.
17. **Птицын А. Б.** Геохимические основы геотехнологии металлов в условиях мерзлоты. — Новосибирск: Наука, 1992. — 120 с.
18. **Паршин А. В., Спиридонов А. М.** Методические и технические решения геолого-геохимических ГИС для обеспечения комплексных научных исследований золоторудных объектов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2014. — № 3. — С. 72–76.
19. **Плюхин Б. В.** Удокан: климатические особенности и охрана атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1990. — 111 с.
20. **Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды в Забайкальском крае за 2008 – 2009 гг.** / Министерство природных ресурсов и экологии Забайкальского края; ЗабГГПУ. — Чита, 2011. — 182 с.
21. **Недешев А. А., Фалейчик А. А., Фалейчик Л. М.** Математическое моделирование процессов загрязнения атмосферы в районе Удокана // География и природные ресурсы. — 2001. — № 3. — С. 114–120.
22. **Чудненко К. В.** Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. — Новосибирск: Гео, 2010. — 287 с.
23. **Бычинский В. А., Костянецкая Ж. В., Чудненко К. В., Тупицын А. А., Сидоров Ю. И.** Способы расчета и согласования низкотемпературных термодинамических свойств веществ // Геохимия. — 2008. — № 2. — С. 210–214.
24. **Романов В. А.** Потоки рассеяния: сток вещества с суши и водная миграция элементов // Отечественная геология. — 2002. — № 5–6. — С. 46–50.
25. **Пособие по гидравлическим расчетам малых мостов и водопропускных труб на железных и автомобильных дорогах.** — М.: Транспорт, 1992. — 132 с.