

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271 + 272

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРОДОПОДОБНЫХ ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОСВОЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ АРКТИКИ

К. Н. Трубецкой, Ю. П. Галченко¹, Г. В. Калабин²

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: ¹shtrek33@mail.ru,
²kalabin.g@gmail.com, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Обсуждается проблема поиска путей преодоления антагонистических противоречий между техно- и биосферой при освоении минеральных ресурсов Арктики. Показано, что одним из основных путей развития геотехнологии в этих условиях является создание и применение природоподобных горных технологий. Установлено, что иерархический максимум влияния на разрушение естественной биоты криолитозоны связан с накоплением на земной поверхности твердых отходов горно-обогатительного передела, что предопределяет главенствующее значение реализации принципа замкнутого цикла обращения твердого вещества литосферы в кластере природоподобной горной технологии. Предложена и разработана идея согласования функциональной структуры технологии добычных работ с внутренним строением криогеоресурса и соотношением во времени и пространстве составляющих его компонентов.

Арктическая зона, биота, минерально-сырьевой комплекс, криолитозона, температурный ресурс, природоподобные технологии

DOI: 10.15372/FTPRPI20190307

Экстенсивные методы освоения минеральных ресурсов литосферы привели к тому, что наиболее доступные по своему положению и геологическому строению месторождения полезных ископаемых всегда обрабатывались опережающими темпами. В результате основные перспективы развития минерально-сырьевого комплекса в большей степени связываются с малоосвоенными и труднодоступными регионами Арктики и криолитозоны, где в силу зональных особенностей и динамики популяций биоты экстенсивная форма развития ресурсопотребления экологически абсолютно недопустима. В этих условиях создание и внедрение природоподобных технологий является одним из наиболее перспективных направлений развития технологической парадигмы на основе идей конвергенции технических и биологических наук [1, 2].

Общая методология преодоления экологического кризиса в области развития минерально-сырьевого комплекса, как минеральной и энергетической основы современной цивилизации, представляет собой двухуровневую систему подходов и действий. На первом уровне антагани-

стическое противоречие между техно- и биосферой трансформируется в цепь локальных противоречий между единичными добывающими предприятиями и конкретными экосистемами, в границах которых они функционируют.

На втором уровне, в условиях определенности свойств каждого из элементов рассматриваемой природно-технической системы освоения недр, каждое из локальных противоречий преодолевается путем целенаправленного создания и применения природоподобных горных технологий, внешнее воздействие которых регламентировано условиями сохранения биоты конкретных экосистем, нарушаемых каждым добывающим предприятием [3]. В специфических условиях Арктики вторая составляющая приобретает первостепенное значение.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Эволюционно обоснованные способы получения человеком энергии Солнца и формирования среды своего обитания создали условия, при которых факт существования и процветания человека на планете предопределяет неизбежное и фактически сложившееся разделение ее поверхности (первичной биоты) на три территориальных комплекса: урбанистическую инфраструктуру искусственной среды обитания человека и промышленного производства; искусственно равновесные экосистемы хозяйственного назначения; естественную биоту Земли (рис. 1). Каждая территория имеет внутренние законы развития, различные целевые функции этого развития и совершенно различное содержание понятия экологической безопасности производства, а значит, критериальной и методологической базы для оценки техногенного воздействия на окружающую среду.

В первом комплексе эта оценка должна строиться на показателях санитарно-гигиенического нормирования и сохранения здоровья человека, во втором — на основе обеспечения наибольшей суммарной экономической эффективности использования взаимодействующих антропогенных систем и сохранять почву как основное средство производства и единственный источник пищевых ресурсов. При освоении минеральных ресурсов Арктики эти задачи не имеют первоочередного значения, так как крупные поселения здесь являются исключением, а сельскохозяйственное использование земель ограничено локальными очагами отгонного оленеводства на базе естественных пастбищ. В этих условиях оценка экологических последствий развития минерально-сырьевого комплекса должна выполняться на принципах и критериях коэволюции антагонистических систем, когда техногенное изменение биоты не должно нарушать ее способность к естественному самовосстановлению [1].

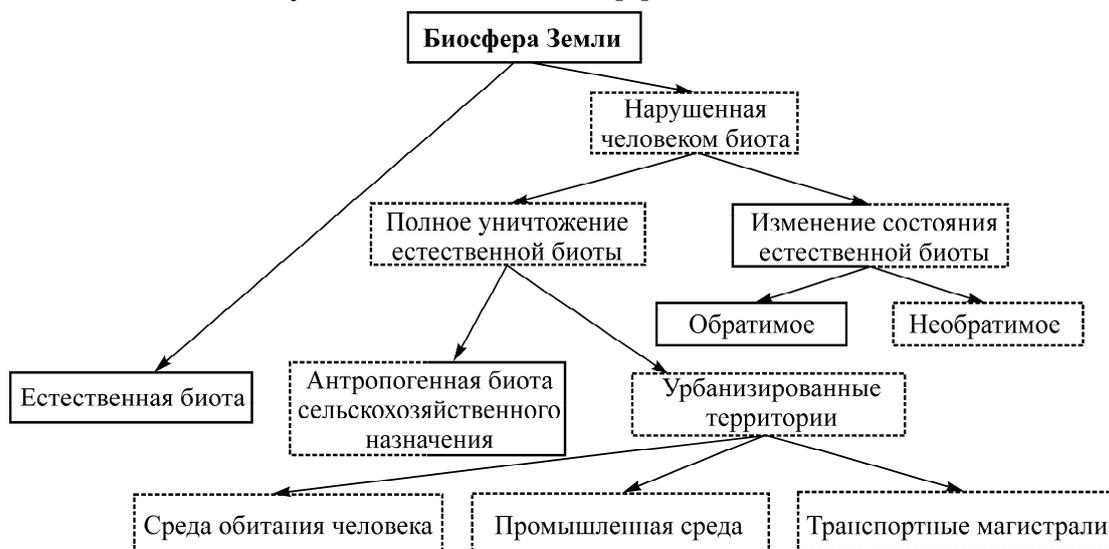


Рис. 1. Структура биосферы Земли, сложившаяся в результате антропогенной деятельности

Специфика методологического подхода к проблеме определяется тем, что биогеоценозы экосистем Арктической и субарктической зоны представляют собой совершенно особые естественно-исторические, географические и структурно-функциональные элементы биосферы. Сохранность многолетнемерзлых грунтов, колебания верхней границы мерзлоты и само ее существование зависят от растительного покрова, имеющего значение важнейшего стабилизирующего фактора. Недостаток тепла, избыток влаги, низкая емкость биологического круговорота, небольшое количество растительного покрова, его замедленная гумификация и минерализация определяют главные черты геохимических процессов и почвообразования. Почвенный покров, как и растительный, характеризуется мозаичностью. Биоты криолитозоны и тундр характеризуются молодостью и бедностью видового состава. Растения отличаются низкой интенсивностью фотосинтеза, медленным накоплением органической массы, малой энергией роста [4, 5].

Проведенные исследования показали, что в биомах тундры и лесотундры влияние общей площади техногенного поражения биоты при строительстве и эксплуатации горного предприятия на время возможного самовосстановления определяется не абсолютным размером этой площади, а величиной соотношения приведенного ее радиуса R_n с длиной естественного переноса семян l_c эдификаторной группы видов. Если $R_n \leq l_c$, самовосстановление фитоценоза биоты идет по короткопроизводному циклу, и его время не зависит от площади техногенного поражения, а определяет только интенсивность вегетации и продуктивность фитоценоза. При больших масштабах техногенного воздействия ($R_n > l_c$) процесс самовосстановления фитоценоза приобретает итерационный характер и общая продолжительность периода восстановительной сукцессии возрастает прямо пропорционально площади техногенного поражения и развивается по длиннопроизводному циклу, с высокой степенью неопределенности в направлении развития демулационных процессов. Это означает, что на стадии проектирования горных предприятий необходимо ориентироваться на решения, обеспечивающие минимальные размеры площади как полного, так и частичного техногенного поражения биоты природных экосистем. В этих условиях становится очевиден экологический приоритет подземного способа разработки месторождений по отношению к открытому или комбинированному, а при определении параметров земельных отводов под промплощадки рудников необходимо использовать уже разработанные в ИПКОН РАН методы формирования и расчета размеров земельных отводов по биологическим ограничениям [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На современном уровне развития геотехнологий добыча полезного ископаемого всегда сопровождается извлечением на поверхность значительных объемов пустых пород, которые не находят хозяйственного применения и становятся отходами горного производства. Общее количество этих твердых отходов зависит от геологии месторождений, способа его разработки и эффективности применяемой технологии первичной переработки добытого минерального сырья. При работе любого добывающего предприятия извлекаемое из недр вещество литосферы делится на три параллельных потока. Количественные соотношения между ними определяются характером принятой геотехнологии:

- полезное ископаемое, поступающее на первичную переработку;
- сопутствующие пустые породы, складываемые на земной поверхности;
- тонкодисперсная пыль, выдаваемая вентиляционной струей в атмосферу.

При открытом способе разработки объем сопутствующих пустых пород, размещаемых в породных отвалах, зависит от глубины залегания месторождений, которая предопределяет величину коэффициента вскрыши $K_{\text{вс}}$ во всех его модификациях. При извлечении из литосферы запланированного в годовом измерении количества товарной руды $V_{\text{г}}$ неизбежна попутная добыча и размещение в раздробленном виде на земной поверхности количества пустых пород $V_{\text{по}}$, рассчитываемого из выражения $V_{\text{по}} = V_{\text{г}} K_{\text{вс}}$.

При подземной разработке месторождений извлекаемый за год объем пустых пород $V_{\text{пп}}$ складывается из объемов горно-капитальных и горно-подготовительных работ, определяемых способом вскрытия месторождения и конструкцией применяемых систем разработки:

$$V_{\text{пп}} = V_{\text{г}} [q_{\text{гкр}} + q_{\text{пр}} (1 - K_{\text{рп}})],$$

где $q_{\text{гкр}}$, $q_{\text{пр}}$ — технологически обусловленный удельный объем горно-капитальных и горно-подготовительных работ на единицу добытой руды, м³/т; $K_{\text{рп}}$ — коэффициент, учитывающий долю рудной подготовки.

Часть размещаемых на поверхности твердых отходов обусловлена необходимостью выполнения обязательного комплекса работ по обеспечению самой возможности разработки месторождения. В период эксплуатации добывающих предприятий эти отходы неизбежны и практически неустранимы. Можно говорить только о чисто теоретических возможностях возврата этих пород в подземное пространство в постэксплуатационный период с применением специальных горных и транспортных технологий. С экологической точки зрения перспективы биологической ассимиляции данного вида техногенных новообразований связаны с процессами естественного самовосстановления биоты экосистем, которые в условиях Арктики характеризуются минимальной интенсивностью. Поэтому появление породных отвалов можно трактовать как формирование в биомах тундры и лесотундры участков с биологическими характеристиками арктической пустыни, не изменяющимися даже после гипотетического перемещения этих отвалов в выработанное пространство рудников в постэксплуатационный период.

Практически все виды добываемых твердых полезных ископаемых готовятся к хозяйственному использованию в процессе первичной переработки. Наиболее глубокой переработке подвергаются руды черных, цветных, редких и драгоценных металлов, а также алмазов, месторождения которых являются первоочередными объектами при освоении сырьевых ресурсов Арктики. Чем выше ценность полезного компонента и чем меньше его содержание в добытой руде, тем бóльшая часть добытого из литосферы вещества останется на месте разработки месторождения в виде хранилища тонкодисперсных отходов обогащения [6].

Общий усредненный баланс твердого вещества литосферы на примере типового золотодобывающего горно-обогатительного предприятия показан на рис. 2. Видно, что при разработке месторождений одного из самых распространенных в Арктической зоне России металлов более 97% от всего извлеченного из литосферы вещества при существующих технологиях добычи и первичной переработки необходимо депонировать в природных экосистемах Арктики. Хранилища твердых отходов обычно располагают в пределах земельного отвода добывающего предприятия, поэтому экологические последствия данного техногенного фактора локализованы в непосредственной близости от промплощадок горных предприятий и заключаются в полном уничтожении первичной биоты на площадях, занятых под эти хранилища.



Рис. 2. Усредненный баланс твердого вещества горно-обогатительного производства при подземной разработке жильных месторождений золота

Средняя землеемкость процесса хранения пустых пород на поверхности в виде отвалов различных конструкций составит

$$\Delta S_{\text{пп}} = H_{\text{от}} K_{\text{рз}} \cos \alpha,$$

где $H_{\text{от}}$ — средняя высота отвала, зависящая от его конструкции, м; $K_{\text{рз}}$ — коэффициент разрыхления дробленого материала в отвале; α — угол наклона поверхности участка ландшафта, занимаемого отвалом, град.

Для оценки экологических последствий целесообразно использовать обратную величину, которая показывает, что для складирования 1 м^3 твердых отходов горно-обогатительного передела необходимо полностью уничтожить первичную биоту Земли на площади $S_{\text{зy}}$:

$$S_{\text{зy}} = \frac{1}{\Delta S_{\text{пп}}} = \frac{1}{H_{\text{от}} K_{\text{рз}} \cos \alpha}.$$

Зависимость этого показателя от средней высоты хранилища при различных углах наклона бортов долины показана на рис. 3.

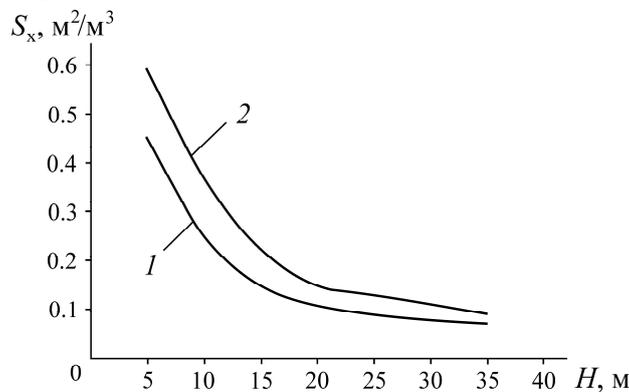


Рис. 3. Изменение удельной площади разрушения биоты от средней высоты хранилища, расположенного в долине водотока, при среднем угле наклона бортов долины 5° (1) и 15° (2)

При использовании традиционных горных технологий в условиях Арктики общая площадь полного уничтожения естественной биоты в процессе создания системы поверхностных хранилищ твердых отходов составит:

$$\text{при открытой разработке} \quad S_{\text{ор}} = V_{\text{по}} S_{\text{зу}} + V_{\text{хв}} S'_{\text{зу}} ;$$

$$\text{при подземной разработке} \quad S_{\text{пр}} = V_{\text{пп}} S_{\text{зу}} + V_{\text{хв}} S'_{\text{зу}} .$$

Экологические последствия такой формы накопления твердых отходов могут быть ослаблены, если при проектировании всех видов хранилищ учитывать особенности межбиоценотической миграции продуцированной биомассы в экосистемах криолитозоны и размещать хранилища в биоценозах транзитных позиций ландшафтов, обладающих наибольшей устойчивостью к внешним воздействиям [4, 7]. Кардинальное решение проблемы возможно только на основе создания и применения геотехнологий, частично или полностью исключая необходимость хранения твердых отходов на земной поверхности.

Применительно к особенностям геологии, географии и разработки твердых полезных ископаемых месторождений можно выделить три взаимно дополняющих друг друга технологических путей сокращения объемов твердых отходов, размещаемых на земной поверхности:

- за счет создания технологий их использования в других отраслях хозяйства;
- благодаря избирательной выемке полезного ископаемого на всех видах горных работ;
- посредством частичного (в идеале полного) возврата переработанного вещества литосферы в выработанное пространство.

Возможности первого направления определяются наличием технологий повторного использования твердых отходов горного производства в освоенных районах, но не имеют реальной перспективы в экономико-географических условиях освоения месторождений в криолитозоне [8].

Рассматривая второе направление, отметим, что современные тенденции в развитии горных технологий плохо согласуются с требованиями по сохранению природы Арктики. По мере роста энерговооруженности добычных работ, расширения спектра функциональных возможностей горных машин и быстрого совершенствования методов обогащения руд наметилась тенденция к приоритетному повышению количественных показателей добычи за счет снижения качественных. Технологические решения принимаются исходя из обеспечения условий применения более мощного и габаритного оборудования с последующей передачей решения проблемы избыточного разубоживания обогатительному комплексу. При этом дополнительные затраты на первичную переработку руды компенсируются повышением экономической эффективности добычных работ. Экологические последствия таких решений ничем не компенсируются и накапливаются со временем. Обязательным условием создания и развития природоподобных горных технологий в условиях Арктики становится приоритетное применение избирательной выемки полезного ископаемого.

Технологической основой реализации этого принципа являются варианты разделения руд и пород на различных стадиях процесса разработки месторождений. Общая концепция развития этого технологического направления заключается в том, что уровень избирательности технологии добычи полезных ископаемых путем целенаправленного выбора возможных решений приводится в соответствие с характером и уровнем изменчивости естественного распределения полезного компонента в разрабатываемом участке литосферы, а пустые породы, включенные в процесс добычных работ, остаются в подземном пространстве добывающего предприятия. Становится очевидным, что каждому сочетанию вида неравномерности оруденения и способа разделения руды и породы должно соответствовать технологическое решение, реализуемое на одной из стадий ведения добычных работ.

Систематизация этих решений в соответствии с общими принципами классификации приведена в таблице. Видно, что на современном уровне развития мы располагаем достаточно широким набором геотехнологических решений в области ведения избирательной выемки полезных ископаемых, что позволит использовать их в любых горно-геологических условиях разработки месторождений в криолитозоне.

Классификация способов избирательной отработки жил

Класс	Группа	Вид
1. Отработка с разделением руды и породы по площади блока	1.1. С отбойкой пустой породы	1.1.1. С выдачей породы из блока 1.1.2. Без выдачи породы из блока 1.1.3. С разнонаправленным отбросом руды и породы взрывом
	1.2. Без отбойки пустой породы	1.2.1. С оставлением породных целиков
2. Отработка с разделением руды и породы по мощности	2.1. Валовая отбойка с переизмельчением руды	2.1.1. С разделением на поверхности 2.1.2. С разделением под землей
	2.2. Валовая отбойка с переизмельчением породы	2.2.1. С разделением на поверхности 2.2.2. С разделением под землей
	2.3. Щелевая отбойка руды	2.3.1. По падению жилы
		2.3.2. По простиранию жилы

Третье направление открывает наиболее интересные перспективы решения геоэкологических задач путем создания природоподобных горных технологий с полностью или частично замкнутым циклом обращения вещества, извлеченного из литосферы в процессе разработки месторождения. Реальные возможности создания и применения таких технологий появляются при разработке месторождений в криолитозоне, где низкая температура горных пород была эффективно использована для возведения льдопородных искусственных массивов при ведении закладочных работ [9].

Принципиальная схема организации замкнутого цикла обращения твердого вещества как основного элемента природоподобной геотехнологии включает в себя четыре основных технологических блока, выделяемых по виду используемого температурного ресурса (рис. 4):

- подготовка отходов к подаче в подземное пространство, проводимая на поверхности за счет использования климатического температурного ресурса (замораживание брикетов);
- транспортирование замороженных брикетов из хвостов обогащения до закладываемого выработанного пространства;
- формирование техногенного массива, заполняющего выработанное пространство;
- восстановление массива многолетней мерзлоты в выработанном пространстве за счет геологического температурного ресурса.

Процесс восстановления массива вечной мерзлоты в выработанном пространстве протекает при использовании геологического температурного ресурса мерзлых пород, имеющих постоянную температуру. Выделяют три этапа формирования техногенного массива в выработанном пространстве: заполнение выработанного пространства замороженными на поверхности брикетами; заполнение пустот сформированного насыпного массива пульпой; замерзание двухфазного массива. Продолжительность первого этапа равна числу месяцев со средней температурой воздуха ниже, чем критическая по условиям замерзания брикетов. Остальное время занимает второй этап процесса. Третий этап не связан с температурой наружного воздуха, и его продолжительность прямо пропорциональна температуре многолетнемерзлых пород.

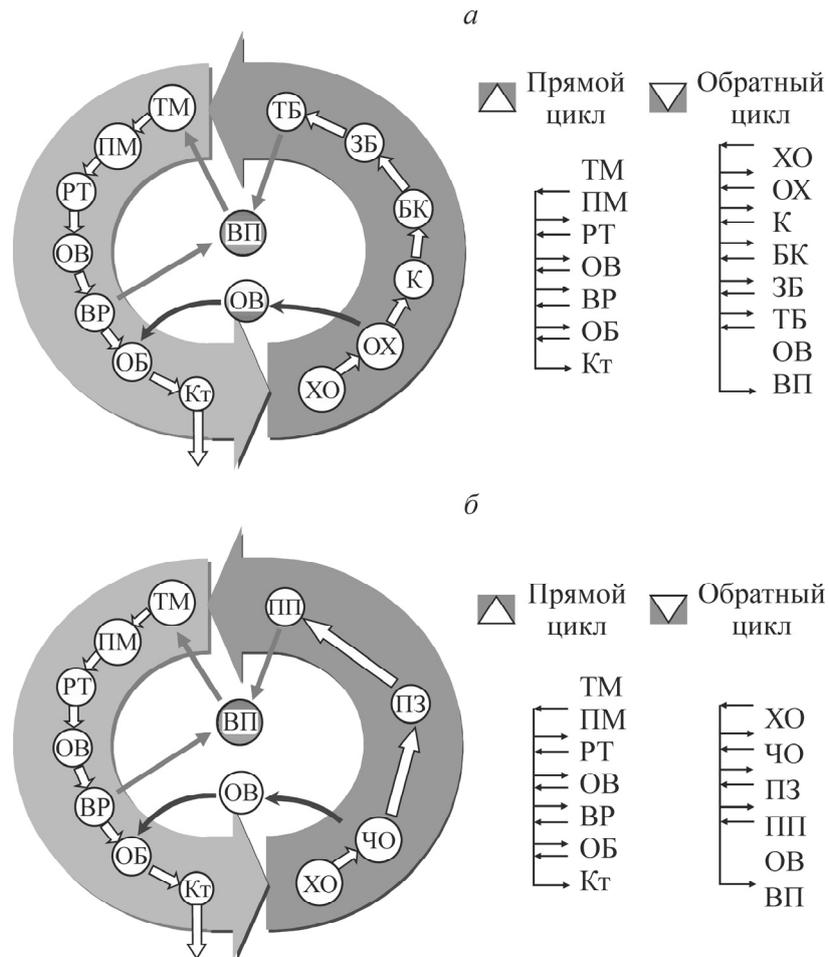


Рис. 4. Принципиальная схема природоподобной технологии с замкнутым циклом обращения твердого вещества для зимнего (а) и летнего (б) периода: ТМ — техногенный массив; ПМ — природный массив; РТ — рудное тело; ОВ — очистная выемка; ВР — выдача руды; ОБ — обогащенные руды; Кт — выдача концентрата; ХО — хвосты обогащения; ОХ — обезвоживание хвостов; К — кеки влажностью 10 %; БК — брикетирование кеков; ЗБ — замораживание брикетов; ОВ — обратная вода; ВП — выработанное пространство; ЧО — частичное обезвоживание; ПЗ — пульпа для закладки; ПП — перекачка пульпы

ВЫВОДЫ

Любая технология, созданная человеком, нарушает естественный оборот вещества и энергии в экосистеме нашей планеты самым фактом создания какого-либо продукта, которого ранее не было в природе. Поэтому применяемое словосочетание “экологически чистая (безопасная) технология” некорректно. Можно говорить только о степени опасности той или иной технологии для какой-либо экосистемы.

Сформулированные биогенные принципы построения природоподобных геотехнологий освоения недр Земли следует рассматривать как перспективные направления развития горных технологий, реализация которых позволит снизить техногенное воздействие на внешнюю среду до неизбежного уровня, обусловленного самим фактом искусственного изъятия части материала литосферы в хозяйственных целях и обеспечивающего возможность самовосстановления биоты экосистем после окончания горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С. Природоподобные технологии — новые возможности и новые угрозы // Индекс безопасности. — 2017. — № 3–4 (118–119). — Т. 22. — С. 103–108.
2. Глобальное будущее 2045. Конвергентные технологии (НБИКС) и трансгуманистическая эволюция / под ред. Д. И. Дубровского. — М.: ООО “ИздатМБА”, 2013. — 272 с.
3. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Геоэкология освоения недр Земли и экогеотехнологии разработки месторождений. — М.: Научтехлитиздат, 2015. — 359 с.
4. Зональные типы биомов России: антропогенные и естественные процессы восстановления экологического потенциала ландшафтов / под ред. К. М. Петрова. — СПб.: СПбГУ, 2003. — 246 с.
5. Kuylentierna J. C. I., Rodhe M., Cinderby S., and Hicks K. Acidification in developing countries: ecosystem sensitivity and the critical load approach on a global scale, AMBIO, 2001, Vol. 30, No. 1. — P. 20–28.
6. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов: теория и практика флотации. — М.: Наука, 1993. — 206 с.
7. Васильев А. А., Дроздов Д. С., Маликова Г. В., Мельников В. П., Москаленко Н. Г., Орехов П. Т., Павлов А. В., Пономарева О. Е., Украинцева Н. Г. Динамика криолитозоны Российской Арктики в связи с изменениями климата. Экспедиционная деятельность в рамках Mill 2007/08. Т. 2. Экспедиции 2008 г. АНИИС-П, 2009. — С. 98–103.
8. Калабин Г. В. Основной принцип новых технологий // Экоресурс. Руды России. — 2001. — № 3. — С. 78–81.
9. Ельчанинов Е. И. Проблемы управления термодинамическими процессами в зоне влияния горных работ. — М.: Наука, 1989. — 239 с.
10. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Возобновляемые источники энергии, как георесурс в системе техногенного преобразования недр // Горн. журн. — 2015. — № 9. — С. 44–49.
11. Рыльникова М. В., Галченко Ю. П. Возобновляемые источники энергии при комплексном освоении недр. — М.: ИПКОН РАН, 2015. — 122 с.

Поступила в редакцию 20/IV 2019

После доработки 04/VI 2019

Принята к публикации 28/V 2019