ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, 2020, том 90, № 6, с. 560–566

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

ПРИРОДОПОДОБНЫЕ И КОНВЕРГЕНТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ОСВОЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ЛИТОСФЕРЫ

© 2020 г. К. Н. Трубецкой[a,*], В. Н. Захаров[a,], Ю. П. Галченко[a,***]**

[a] *Институт комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия*

**E-mail: krasavin_08@mail.ru*

***E-mail: dir_ipkonran@mail.ru;*

****E-mail: schtrek33@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.03.2020 г.
После доработки 20.03.2020 г.
Принята к публикации 10.04.2020 г.

Происходящие в последние годы изменения в общественном сознании неизбежно приводят к экологизации мышления во всех сферах человеческой деятельности. Наиболее наглядное отражение этого явления – нарастающий интерес к природоподобным технологиям, с которыми связывают основные надежды на решение глобального экологического кризиса, порождённого продолжительным антагонистическим противостоянием техно- и биосферы.

Рассматривая понятие “природоподобные технологии” как обозначение генерального направления модернизации общетехнологической парадигмы, необходимо выделить по признаку наличия или отсутствия у применяемых нами технологий прямых аналогов в живой природе два конкретных направления: во-первых, построение технологий на основе дублирования в техносфере эффективных процессов, наблюдаемых в живой природе (природовоспроизводящие технологии); во-вторых, создание технологических систем за счёт переноса в техносферу эффективной функциональной структуры обращения вещества и энергии в биологических системах (конвергентные технологии).

Применительно к проблеме экологизации технологической парадигмы минерально-сырьевого комплекса методология создания экологически сбалансированной технологии как полиобъектного кластера строится на известных положениях гомеостатики, то есть путём поэтапного формирования технологического гомеостата на основе структуры гомеостата биологического с заменой его содержательных элементов на геотехнологические целевые аналоги. Результат такой трансформации – построение конвергентной горной технологии комплексного освоения месторождений. Её применение обеспечит разработку технических систем, позволяющих ограничивать внешние экологические воздействия благодаря постэксплуатационному самовосстановлению фитоценозов естественной биоты.

Ключевые слова: литосфера, минеральные ресурсы, комплексное освоение недр Земли, природоподобные технологии, гипотеза, гомеостатика, биотехнологические принципы, конвергентная горная технология, природно-технические системы, кластеры, экологическая эффективность.

DOI: 10.31857/S0869587320050102

ТРУБЕЦКОЙ Климент Николаевич – академик РАН, главный научный сотрудник ИПКОН РАН. ЗАХАРОВ Валерий Николаевич – член-корреспондент РАН, директор ИПКОН РАН. ГАЛЧЕНКО Юрий Павлович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИПКОН РАН.

Главное антагонистическое противоречие между биологической сущностью человека и абиологичными способами получения им энергии Солнца для создания пищевой базы и среды своего обитания – определяющий фактор, формирующий образ нашей технократической цивилизации. Её развитие на основе идей безграничного роста и удовлетворения потребностей индивидуума привело к тому, что в экосистеме "планета Земля" возникла новая форма развития биосферы – антропогенный кризис. Такие кризисы проявлялись на всех этапах развития человеческого общества, они носили разный характер, но имели одну причину: несоответствие уровня и структуры потребления человека ресурсным возможностям естественной биоты нашей планеты [1]. Выходы из этих кризисов всегда были связаны со сменой технологических укладов [2].

В области горных наук фундаментальное значение имеет понятие *комплексного освоения недр*. Данное понятие относится к элементам вариативной части учения о литосфере и опирается на знания базовой части наук о Земле. Здесь тесно увязаны все основные направления исследований в области техногенного изменения литосферы в процессе получения сырьевых и энергетических ресурсов, которые обеспечивают существование и развитие антропосферы. Поэтому вполне естественно, что этапность этого развития во времени предопределила смысловую динамику внутреннего содержания понятия комплексного освоения недр.

Как фундаментальная научная проблема и актуальное направление исследований это понятие было впервые сформулировано академиком А.Е. Ферсманом [3]. Чуть позже, академиками Н.В. Мельниковым и А.В. Сидоренко смысл комплексного освоения минеральных ресурсов литосферы был раскрыт и обоснован с позиций государственной значимости. Цель такого освоения была определена как укрепление минерально-сырьевой базы страны, что, в свою очередь, предполагало производство широкой номенклатуры товарной продукции на основе повышения полноты и экономической эффективности извлечения полезных ископаемых в процессе их добычи и переработки [3, 4].

Второй этап трансформации понятия комплексного освоения недр связан с трудами академика М.И. Агошкова, который систематизировал представления о *ресурсном потенциале литосферы* и предложил рассматривать проблему с двух позиций: с одной стороны, полного использования осваиваемых георесурсов (не только полезных ископаемых), с другой – сочетания существенно различных способов их добычи. Имелось в виду, что на этой основе может быть достигнут оптимальный народно-хозяйственный и социальный эффект от промышленного освоения минеральных ресурсов [3, 5].

На третьем этапе исследования академика К.Н. Трубецкого позволили включить в состав комплексного освоения недр ещё и процессы создания новых ресурсов, в том числе путём перевода потенциальных ресурсов (то есть не полностью выявленных и оценённых) в реальные. Это потребовало целенаправленного изменения условий доступа к минеральным образованиям, их качества, а также параметров, сроков формирования и состояния выработанного пространства [3, 6].

Указанная трансформация содержания понятия комплексного освоения недр полностью отражает основные особенности современной парадигмы формирования минерально-сырьевой составляющей техносферы, которая характеризуется:

• экстенсивной формой развития минерально-сырьевого комплекса в целом, когда темпы увеличения объёма извлекаемого из литосферы вещества более чем на порядок опережают темпы прироста населения планеты;

• решением проблем защиты и восстановления естественной биоты Земли по остаточному принципу – после получения конечного продукта, что заметно ускоряет развитие глобального экологического кризиса.

Вполне очевидно, что ускоренное потребление минеральных ресурсов, то есть накопленных в ходе эволюции планеты запасов вещества и энергии, связано с целым рядом трудноразрешимых противоречий. При ярко выраженной антагонистической форме конфликта между природой и человеком совместное их существование возможно только при условии реализации принципа равных возможностей для развития техно- и биосферы. Этот принцип определён академиком Н.Н. Моисеевым как "стратегия коэволюции" антагонистических по своему внутреннему содержанию систем [7]. В рамках этой стратегии невозможно полностью преодолеть обозначенное выше глобальное противоречие, но придать ему неразрушительную для живой природы форму вполне возможно, более того – совершенно необходимо.

Именно необходимость создания новых, более широких возможностей развития минерально-сырьевого комплекса предопределяет внутреннее содержание современного (четвёртого) этапа трансформации понятия комплексного освоения недр за счёт включения в него *экологического ресурса литосферы*, сохранения её экологической функции.

Ускорение технического прогресса в сочетании с глобализацией усиливает взаимозависимость общества и технологий. В настоящее время

используемые при освоении минеральных ресурсов литосферы технологии построены в соответствии с узкоспециальными знаниями и выбираются только по технико-экономическим признакам. На основе такого подхода удаётся решать отдельные экологические задачи исключительно путём выполнения дополнительных природоохранных операций, но он не позволяет урегулировать комплекс проблем, связанных с сохранением биологического разнообразия и особенностями строения защищаемых природных объектов. Поэтому в методологическом плане требования по экологической безопасности должны предъявляться не к отдельным операциям или процессам – их следует заложить в перспективную общетехнологическую парадигму таким образом, чтобы сохранение естественной биоты Земли стало неотъемлемым свойством создаваемых и применяемых технологий.

В самом общем виде идея построения таких технологий была высказана ещё академиком В.И. Вернадским. Именно он сформулировал ноосферную задачу по встраиванию технологических процессов в циклы естественного оборота вещества в биосфере и их неразрушающему взаимодействию [8]. Вполне очевидно, что решение этой общей задачи возможно только путём создания и применения технологий с новыми свойствами. В методологическом плане технологические ответы на экологические вызовы следует искать в изучении систем, где эти ответы уже получены, то есть в биологических системах.

Развитие техносферы как основы современной цивилизации определяется простой функциональной триадой знание–умение–результат (или наука–технология–продукт). Качественная характеристика элементов этой триады становится понятной при её рассмотрении в обратном порядке: необходимые для нас свойства продукта предопределяют внутреннее содержание технологии, а оно в свою очередь указывает на то, какую именно часть общего знания мы должны использовать при создании данной технологии. Поэтому часто применяемое сегодня словосочетание “природоподобные технологии” надо трактовать не как создание каких-то необычных технологий, а как определение вектора приложения поисковых усилий и как указание на то, что новые пути целенаправленного преобразования технологий мы намерены найти на основе знаний о живой природе.

Известно, что в самом общем виде технология представляет собой практическое применение знания для создания методов производственной деятельности. Тогда *природоподобными следует считать технологии, создание и развитие которых происходит на основе знаний о живой природе*. Исходя из внутреннего содержания технологий можно выделить два подхода к их поиску: разработка природоподобных решений для технологий, имеющих аналоги в живой природе и не имеющих таких аналогов.

В первом случае инновационное развитие определённой группы технологий основано на дублировании уже существующих в живой природе процессов. Это направление имеет достаточно длинную историю, которая, видимо, начинается с бионики. Здесь имеются и серьёзные результаты, и огромные перспективы, которые будут постоянно расширяться по мере углубления наших знаний о материальном мире. Такие технологии можно назвать *природовоспроизводящими*, построенными на основе дублирования процессов, обеспечивающих существование организмов в составе биоты природных экосистем.

Признавая очевидную широту возможностей развития и реализации этого подхода, следует указать и на столь же очевидную их ограниченность. Как было показано в работах [1, 9], человек, обретая в ходе эволюции разум, продолжил своё дальнейшее развитие вне естественного баланса солнечной энергии. Поэтому фундаментом созданной на этом пути технократической цивилизации стали процессы и технологии, у которых нет и не может быть прямых аналогов в биологических системах. Действительно, в живой природе нет аналогов добыче полезных ископаемых, пирометаллургии, обработке металлов или колёсному транспорту и т.п. В эту группу попадают практически все технологии, благодаря которым создаётся искусственная среда обитания человека на территориях, которые ранее занимала естественная биота Земли. Поэтому здесь целью поиска становится не какая-то отдельная технология, а форма экологически уравновешенного (коэволюционного) взаимодействия антагонистических компонентов в ходе развития единой природно-технической системы. Так как эволюция любой системы – процесс имманентный, непосредственно ей присущий, то очевидно, что в природно-технической системе источником преобразования технической составляющей может быть только природная составляющая, а развитие системы в целом предстаёт как воспроизводство найденных природой эффективных функциональных структур при использовании уже имеющихся технологий. Отсюда следует, что необходимые качества производственных систем должны обеспечиваться за счёт сближения (конвергенции) их функциональной структуры с функциональной структурой биологических систем, которые уже обладают искомыми качествами. В такой постановке вопроса можно определить второй тип природоподобных технологий – *конвергентные*, в рамках которых антропогенные процессы взаимодействуют в биоподобной функциональной структуре.

Идея о принципиальной возможности создания конвергентных технологий для разработки месторождений полезных ископаемых была впервые выдвинута в ИПКОНе РАН в ходе проведения цикла поисковых исследований в области перспективного развития технологической базы комплексного освоения недр [10]. Изучение вопроса о несоответствии масштабов времени в процессах возобновления и потребления природных ресурсов (а это одна из основных причин опережающего роста экологических последствий развития минерально-сырьевого комплекса) привело к гипотезе о том, что *уровень экологической безопасности техногенных геосистем по отношению к системам биологическим пропорционален степени единообразия принципов функционирования обеих систем* [10]. Детальная разработка этой гипотезы показала, что именно с этим научным направлением в геотехнологии можно и нужно связывать основные ожидания по кардинальному снижению вклада минерально-сырьевого комплекса в глобальный экологический кризис, порождённый явным несоответствием темпов роста добычи вещества литосферы потенциалу демутации естественной биоты Земли.

В результате комплекса аналитических, теоретических и экспериментальных исследований, поддержанных РФФИ, были выделены принципы функционирования биологических систем, определяющие движение в них вещества и энергии, одновременное действие которых обеспечивает полную экологическую чистоту каждой системы по отношению к другим.

Учитывая антагонистический характер противоречий между техно- и биосферой, методические подходы к решению вопроса о возможности конвергенции биологических и технических знаний исходят из основных положениий гомеостатики *о способах поддержания жизненно важных параметров взаимодействующих систем путём управления противоречиями*. Сильно упрощая, гомеостатические механизмы можно представить как результат интеграции (“склеивания”) по определённым правилам двух антагонистов. Такая система оказывается устойчивой, несмотря на то, что каждый антагонист в ней может являться неустойчивым образованием [11].

Применение методов гомеостатической трансформации позволяет перейти от анализа принципов функционирования равновесных биологических систем к синтезу функциональной структуры горных технологий, экологические последствия использования которых будут сбалансированы с локальной устойчивостью естественной биоты, воспринимающей техногенную нагрузку. Таким образом можно перенести биологическую информацию в техносферу: геотехнологический гомеостат поэтапно формируется на основе структуры гомеостата биологического с заменой содержательных элементов на геотехнологические целевые аналоги. Применительно к проблеме комплексного освоения недр это означает, что антагонистические по своему внутреннему содержанию компоненты действующих природно-технических систем не противопоставляются друг другу, а объединяются в составе конвергентной технологии комплексного освоения месторождения. В этом случае управляемая гармония между несовместимыми компонентами достигается за счёт подобия их функциональных структур и ограничения уровня техногенных воздействий диапазоном толерантности видов-эдификаторов биоты природных экосистем (рис. 1).

Система расположения биотехнологических принципов формирования конвергентных горных технологий, показанная на рисунке 1, отражает иерархию их функциональной дифференциации по характеру участия в экологически сбалансированном процессе разработки месторождения. Первые два размещённые по вертикали принципа формируют новый облик горной технологии добычных работ, которая возникает благодаря гомеостатической трансформации в техносферу принципов функционирования биологических систем, определяющих изменение состояния вещества в них.

Третий биотехнологический принцип отражает необходимость новой организации функциональной структуры горнотехнической системы разработки месторождения в соответствии с обращением вещества в биологических системах.

Два других принципа (4 и 5 – внешняя сторона схемы) определяют характер и условия взаимодействия компонентов всей природно-технической системы освоения ресурсов участка недр, которое обеспечивает сохранение устойчивости природной составляющей, а также экологически приемлемое энергоснабжение технической составляющей. Одновременная реализация всех биогенных принципов позволит структурировать во времени и пространстве процесс получения полезных ископаемых в полном соответствии с ограничениями экологического императива и устойчивого развития.

Минеральные ресурсы литосферы, по сути своей, представляют собой множество обнаруженных и идентифицированных месторождений полезных ископаемых. Использование сформулированных выше принципов открывает перспективу создания новой парадигмы технологического развития минерально-сырьевого комплекса, направленной на кардинальные решения в области сохранения естественной биоты Земли, и определяет исполнительную структуру основ-

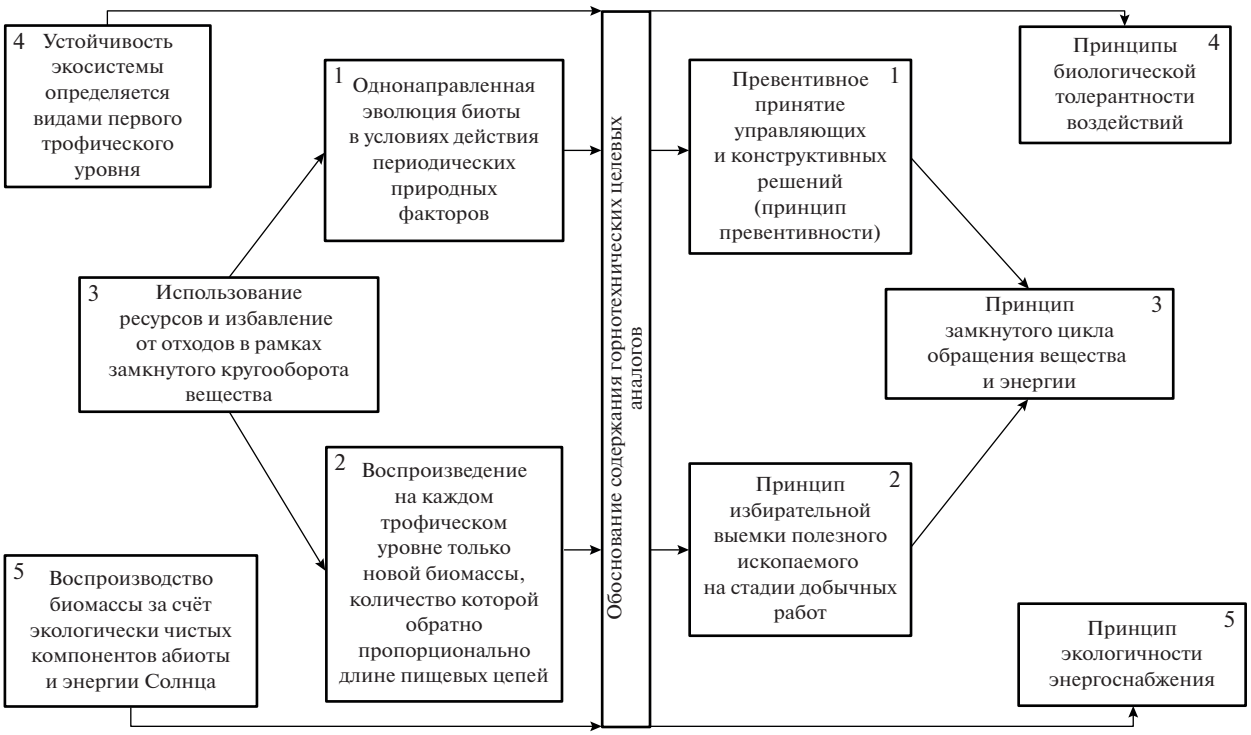

Рис. 1. Биотехнологические принципы формирования конвергентной горной технологии освоения месторождения

ного объекта технологических исследований – природно-технической системы освоения запасов полезных ископаемых, локализованных в литосфере Земли.

Для идентификации понятия “природно-техническая система освоения запасов литосферы” необходимо определить динамику и особенности внутреннего развития природной и технической подсистем, а также рассмотреть характер их взаимодействия с тем, чтобы при освоении конкретного участка литосферы были бы обеспечены условия “оптимального функционирования природно-технической системы” на основе “экологически безопасного размещения элементов техносферы” [12].

Природная составляющая в данном случае формируется не по принципу накопления и констатации данных о масштабах и интенсивности техногенного нарушения основных геосфер Земли в процессе извлечения полезного ископаемого – она должна представлять собой систему действий и ограничений по оценке и преодолению биологических последствий этих нарушений в различных масштабах времени, то есть может быть рассмотрена как полиобъектный кластер. Исходя из известного определения понятия производственного кластера как “механизма концентрации усилий” [13], можно утверждать, что основные элементы природно-технической системы освоения запасов месторождения – это два полиобъектных кластера, которые концентрируют усилия в разных направлениях. Производственно-технический кластер имеет своей целью эффективную и безопасную добычу полезного ископаемого, а природоохранный формируется как система действий и ограничений по предотвращению необратимых экологических последствий неизбежного локального разрушения литосферы. Каждый из этих кластеров состоит из нескольких монокластеров низшего порядка, которые, в свою очередь, формируются из функциональных систем различного назначения (рис. 2).

Взаимодействие указанных составляющих, как и в каждой сложной системе, определяется тем, что одна из них управляющая, а другая – исполнительная [14]. Исполнительная, в нашем случае – техническая составляющая, реализует основную функцию системы – добычу полезного ископаемого, а управляющая – регулирует её проведение с учётом изменяющихся условий среды и требований сохранения естественной биоты Земли. Отсюда с очевидностью следует, что функциональная эффективность технической составляющей в общей системе всегда будет определяться характером взаимодействия природного и технического кластеров по критериям экологической безопасности и эффективности применяемых технологий.

В целом модернизация технологической парадигмы развития минерально-сырьевого комплек-

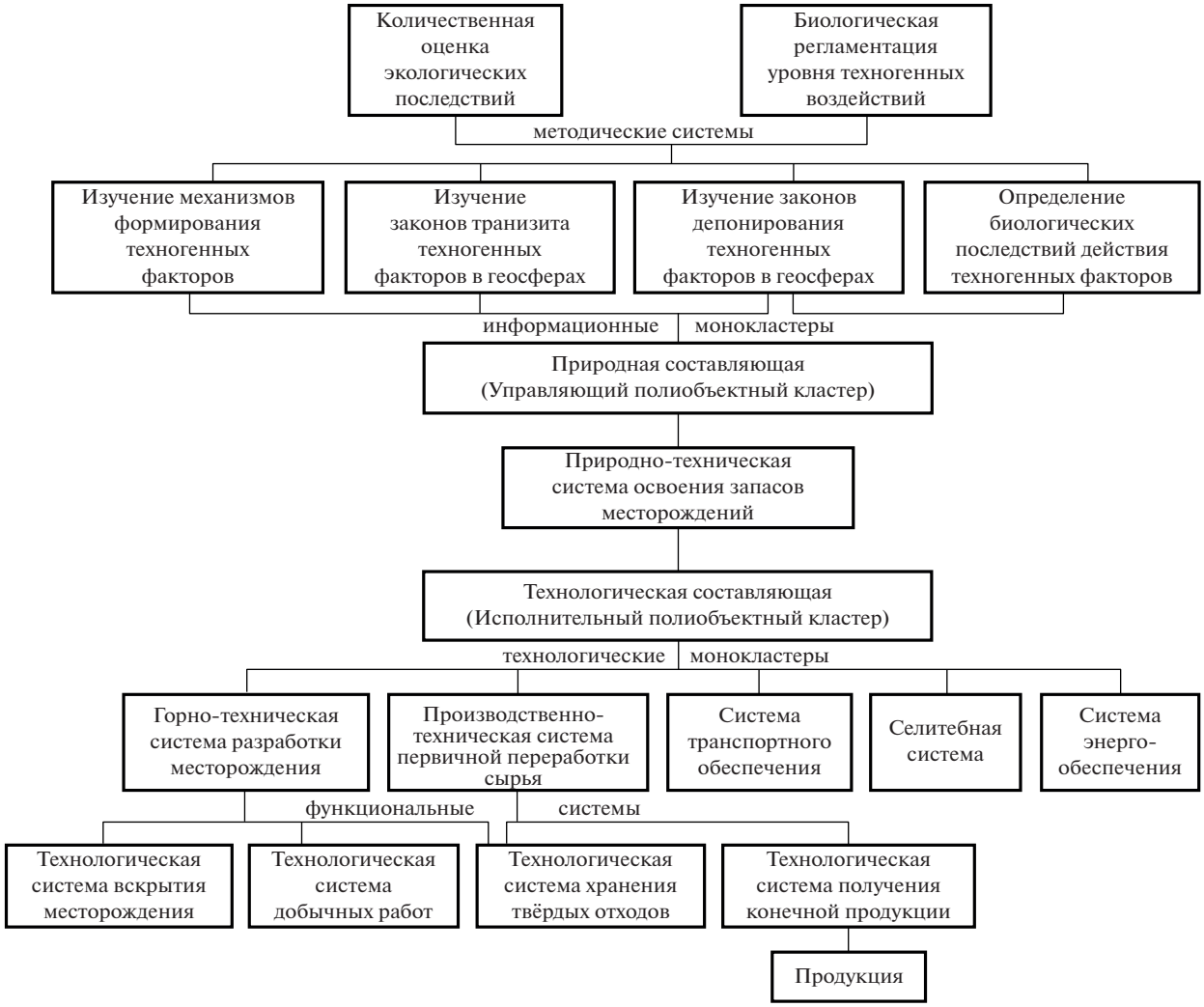

Рис. 2. Схема функциональной структуры конвергентной технологии комплексного освоения месторождения

са в направлении постепенного перехода к конвергентным технологиям позволит разрешить в этой сфере деятельности глобальное антагонистическое противоречие между техно- и биосферой путём его трансформации в цепь локальных противоречий между конкретным добывающим предприятием и реальной экосистемой. Каждое локальное противоречие преодолевается за счёт целенаправленного создания и применения технологических решений, уровень экологического воздействия которых не выходит за рамки диапазона толерантности видов-эдификаторов фитоценоза нарушаемых экосистем.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 99-05-65475; 00-05-64112; 02-05-64562; 05-05-64821; 08-05-00889; 12-05-00011; 15-05-07017; 18-05-70019.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П.* Геоэкология освоения недр и экогеотехнология разработки месторождений. М.: Научтехлитиздат, 2015.
2. *Гуриева Л.К.* Концепция технологических циклов // Инновации. 2004. № 10. С. 70–75.
3. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / Под ред. К.Н. Трубецкого. М.: Изд-во Академии горных наук, 1997.
4. *Мельников Н.В.* Проблемы комплексного использования минерального сырья // Горная наука и рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов. М.: Наука, 1978. С. 5–15.
5. *Агошков Н.В.* Развитие идей и практики комплексного освоения недр. М.: ИПКОН АН СССР, 1982.
6. *Трубецкой К.Н.* Развитие новых направлений в комплексном освоении недр. М.: ИПКОН АН СССР, 1990.
7. *Моисеев Н.Н.* Человек и ноосфера. М.: Молодая гвардия, 1990.

8. *Вернадский В.И.* Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2007.

9. *Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П.* Природоподобные горные технологии – перспектива разрешения глобальных противоречий при освоении минеральных ресурсов литосферы // Вестник РАН. 2017. № 7. С. 643–650.

10. *Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П., Бурцев Л.И.* Стратегия совместного развития природы и общества // Вестник РАН. 1998. № 11. С. 995–998.

11. *Горский Ю.М., Степанов А.М., Тесминов А.Г.* Гомеостатика: гармония в игре противоречий. Иркутск: РепроцентрА1, 2008.

12. *Осипов В.И.* Геоэкология: понятие, задачи, приоритеты // Геоэкология, инженерная экология, гидрогеология, геокриология. 1997. № 1. С. 3–11.

13. *Громыко Ю.В.* Век META: Современные деятельностные представления в социальной практике и общественном развитии. М.: Наука, 2006.

14. *Лисецкий С.В.* Сложные системы // Программные продукты и системы. 2005. № 3. С. 10–15.