УДК 622:504.03 DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-36-47

Научные основы эколого-территориального подхода к проектированию и управлению природно-технологическими системами в минерально-сырьевом комплексе

Студенок Г. А.[1]*, Хохряков А. В.[2], Фролов С. Г.[1], Старцев В. А.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
[2] ООО «Инженерные изыскания», г. Екатеринбург, Россия
e-mail: genand@mail.ru

Реферат

Введение. *В Российской Федерации, как и в целом во всем мире, неуклонно возрастают объемы добычи полезных ископаемых. Есть основания полагать, что эта тенденция сохранится в обозримом будущем с ростом населения и увеличивающимися потребностями в минеральном сырье. Проектирование и управление горными предприятиями как природно-технологическими системами минерально-сырьевого комплекса – многофункциональная деятельность, включающая в себя технологическую, геологическую, экологическую, экономическую, социальную составляющие, что обуславливает необходимость междисциплинарного подхода к ней. В статье как один из вариантов реализации такого подхода рассматривается возможность совместного использования ESG-концепции и SWOT-анализа.*

Методология. *Авторами проанализированы существующие концепции представления и описания природно-технологических систем и подходы к их проектированию и управлению ими в меняющихся условиях деятельности добывающих отраслей. Критически изучен и оценен существующий опыт реализации принципов совместного технологического, экологического, социального и корпоративного управления предприятиями в других отраслях. С использованием методов анализа и синтеза осуществлен поиск научно-практического подхода к использованию упомянутых принципов при решении задач, стоящих перед горной промышленностью.*

Результаты и обсуждения. *Сформулирован алгоритм нахождения оптимальных решений комплексных, взаимосвязанных эколого-технологических, эколого-территориальных и производственно-социальных задач, основанный на совместном применении положений ESG-подхода (основанного на наборе базовых принципов, декларирующих совместный равнозначный учет экологических, социальных и управленческих аспектов в деятельности компаний при принятии технологических, структурных и инвестиционных решений) и SWOT-анализа (метода стратегического планирования, применяемого для оценки внутренних и внешних факторов, которые влияют на развитие компании). Дана оценка возможности и перспективности применения этого алгоритма для предприятий минерально-сырьевого комплекса.*

Выводы. *Впервые предложено комбинированное применение инструментов ESG-анализа (оценка компании, основанная на ее экологических, социальных, технико-экономических и управленческих показателях) и SWOT-анализа в рамках решения комплекса эколого-технологических, эколого-территориальных и производственно-социальных задач. Перспективность применения предлагаемого алгоритма возрастает с развитием цифровых технологий, позволяющих обрабатывать большие массивы данных, что особенно актуально для предприятий минерально-сырьевого комплекса, характеризующихся непосредственной территориальной привязкой к месторождениям минерального сырья, которая обуславливает прямое либо косвенное влияние на разнокачественный ресурсный потенциал территории, включающий человеческий капитал, природные, инфраструктурные, энергетические и другие ресурсы.*

Ключевые слова: *природно-технологические системы; минерально-сырьевой комплекс; ESG-принципы; SWOT-анализ; эколого-территориальный подход.*

Статья подготовлена *(произведен анализ возможности применения геоинформационных систем при решении поставленных задач) в рамках выполнения гос. задания №075-00410-25-00. № гос. рег. 125070908250-1. (FUWE-2025-0002).*

Введение и актуальность темы. Предприятия минерально-сырьевой отрасли являются экстенсивными системами, развивающимися за счет потребления минеральных ресурсов, запасы которых исчерпаемы, и возобновляемых природных ресурсов, вовлекаемых в той или иной форме прямо или косвенно в производственные процессы. При этом происходит постоянное взаимодействие этих ресурсов с антропогенной частью ноосферы – совокупностью социума, научных знаний, техники и технологий [1]. Это взаимодействие, заключающееся в использовании и изменении возобновляемых ресурсов, наряду с потреблением исчерпаемых минеральных ресурсов, приводит, главным образом, к многостороннему, по большей части негативному изменению окружающей среды. Вопросы исчерпаемости ресурсов планеты, определения пределов развития промышленности, загрязнения окружающей среды и связанных с этими факторами социальных последствиях (так называемые «пределы роста»), впервые поднятые научным сообществом еще более 50 лет назад [2], не потеряли актуальности и сегодня.

Особенностью предприятий минерально-сырьевого комплекса является не только известная территориальная привязка к разрабатываемым месторождениям, но и конечность отрабатываемых запасов. По мере исчерпания богатых руд предприятия переходят к добыче руды с более бедным содержанием полезных компонентов и соответствующим увеличением объемов образования отходов добычи, удорожанием работ и увеличением нагрузки на окружающую среду.

Предприятия минерально-сырьевого комплекса, как правило, находятся в непосредственной близости от населенных пунктов, значительная часть населения которых является работниками этих предприятий. Таким образом, экономические трудности, испытываемые предприятиями, и создаваемая ими экологическая нагрузка могут приводить к ухудшению социально-экономических условий территории. В случае закрытия предприятия по причинам экономического характера или вследствие завершения отработки запасов месторождения может оставаться накопленный вред окружающей среде (нерекультивированные территории отработанных карьеров, отвалов, шламо- и хвостохранилищ, загрязненные территории, продолжающие негативно влиять на окружающую среду) и усиливаться социальная напряженность [3]. Сроки эксплуатации месторождений полезных ископаемых измеряются десятилетиями, и само функционирование предприятия минерально-сырьевого комплекса в условиях конкретной территории приводит к превращению природного ландшафта в техногенный, характеризующийся сложной системой связей между предприятием и окружающей средой, включая население. Для оптимального развития предприятия и территории, на которую оно оказывает влияние, необходим всесторонний учет этих связей и их динамики на протяжении всего жизненного цикла предприятия.

Описанные особенности предприятий минерально-сырьевого комплекса и опыт решения связанных с ними задач необходимо учитывать как при проектировании, строительстве и эксплуатации новых предприятий, так и при решении аналогичных вопросов на старопромышленных территориях.

Объемы полезных ископаемых, извлекаемых из недр предприятиями минерально-сырьевого комплекса, во всем мире возрастают. Россия уверенно занимает третье место в списке стран-лидеров мировой добычи полезных ископаемых после Китая и США. Динамика добычи полезных ископаемых в мире и в России за 2010–2023 гг. по данным мировой статистики [4] показывает, что в 2023 г. в мире добыто 19,19 млрд т полезных ископаемых, что на 21,1 % больше, чем в 2010 г. Аналогичные тенденции по Российской Федерации, отображенные в [4] и Государственных докладах о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации (2010–2023 гг.), в целом не противоречат общемировым. Исходя из прогнозных данных ООН по росту народонаселения [5], а следовательно, при дальнейшем увеличении потребностей в минеральном сырье, есть основания полагать, что описанные тенденции сохранятся в обозримом будущем, и вопросы проектирования и управления природно-технологическими системами в минерально-сырьевом комплексе не потеряют своей актуальности.

В статье авторы излагают принципы нового комплексного эколого-территориального подхода к проектированию и управлению природно-технологическими системами в минерально-сырьевом комплексе, который позволит, насколько это возможно, разрешить описанные проблемы или, в зависимости от конкретной ситуации, снизить остроту их последствий. Новый подход базируется на рассмотрении предприятия минерально-сырьевого комплекса и его задач в комплексе с разнообразными взаимосвязанными характеристиками конкретной территории (экологическими, экономическими, социальными и др.). Предлагаемый подход к решению задач предприятия с учетом их отраслевых особенностей и без отрыва от связанных друг с другом экологической ситуации, социальных и экономических условий территории позволит обеспечить ее сбалансированное устойчивое развитие.

Материалы и методы. В настоящее время существует достаточно много определений природно-технологических систем, разнящихся в деталях в зависимости от рассматриваемой области человеческой деятельности. Наиболее близкие к тематике настоящей статьи, по мнению авторов, приведены в [6, 7]. В этой статье под *природно-технологической системой* авторами понимается система, состоящая из природной и технологической частей, которые взаимосвязаны друг с другом, воздействуют друга на друга и выполняют единую социально-экономическую функцию – извлечение из недр полезного ископаемого и его первичную переработку.

Проектирование и управление природно-технологическими системами минерально-сырьевого комплекса тесно связаны между собой. В процессе управления проектные решения, как правило, подвергаются корректировке ввиду динамики разнообразных факторов (экологических, технологических, экономических, социальных и др.). Учет этих факторов в процессах как проектирования, так и управления обусловлен тем, что по своей сути природно-технологические системы минерально-сырьевого комплекса имеют несколько составляющих, основными из которых являются технологическая, геологическая, экологическая, социальная и экономическая, которые, в свою очередь, характеризуются междисциплинарными взаимодействиями (рис. 1). Так, например, условия залегания (геологическая составляющая) определяют технологию добычи (технологическая составляющая). В то же время, химический состав извлекаемой горной массы (геологическая составляющая) во многом определяет экологическую составляющую: химический состав потоков рассеивания минерального вещества в окружающей среде, вызывающих ее загрязнение.

Подобных примеров можно привести множество. Как проектирование, так и управление природно-технологическими системами минерально-сырьевого комплекса предполагают учет описанных составляющих и междисциплинарных взаимодействий, и чем более полным и разносторонним он является, тем успешнее будет функционировать природно-технологическая система. Отметим, что на сегодняшний день важным инструментом, позволяющим обеспечить полноту этого учета, являются разнообразные геоинформационные системы, использованию которых в процессах освоения недр посвящены многие исследования, например [8, 9].

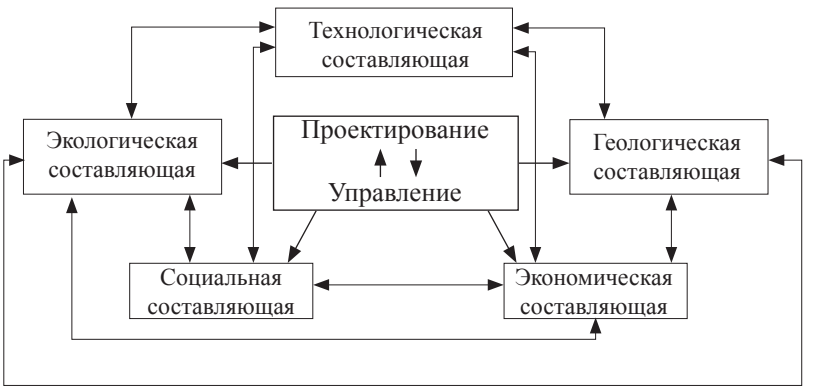

Рисунок 1. Основные междисциплинарные взаимодействия в проектировании и управлении природно-технологическими системами минерально-сырьевого комплекса

Figure 1. Key interdisciplinary interactions in the design and management of natural-technological systems in the mineral resource complex

Полагаем, что для наиболее полного учета приведенных составляющих и междисциплинарных взаимодействий в проектировании и управлении природно-технологическими системами минерально-сырьевого комплекса возможно их рассмотрение с позиций ESG-подхода и метода SWOT, так как оба этих инструмента применяются для оптимального планирования будущей деятельности.

ESG (Environmental, Social, Governance) – это триединая совокупность взаимообусловленных и взаимопроникающих принципов деятельности компании, основанных на защите окружающей среды; создании благоприятных социальных условий, добросовестном отношении к сотрудникам и клиентам; надлежащем корпоративном управлении. Внедрение принципов ESG актуально для предприятий различных отраслей [10]. Понятие ESG было сформулировано в ООН в 2004 г., на базе принципов устойчивого развития. Применяемый для анализа среды метод SWOT – это метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны) и Weaknesses (слабые стороны) – внутренние факторы; Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – внешние факторы. Используя метод SWOT-анализа, можно установить связи между сильными и слабыми сторонами структуры природно-технологической системы и внешними угрозами и возможностями с помощью матрицы (рис. 2). Выявленные цепочки связей в дальнейшем могут быть использованы для обоснования принятия решений в рамках SO-, WO-, ST- и WT-стратегий.

При всем многообразии предприятий минерально-сырьевого комплекса их деятельность характеризуется следующим жизненным циклом: поиск и разведка месторождения – проектирование предприятия – строительство и ввод в эксплуатацию – добыча полезного ископаемого – закрытие предприятия и реабилитация территории. На каждом из этапов жизненного цикла предприятия имеются свои особенности описанных составляющих его деятельности и выраженность междисциплинарных взаимодействий. Так например, экологическая и экономическая составляющие в наибольшей степени проявляются на основном этапе деятельности предприятия и в период закрытия и рекультивации, а взаимосвязь геологической и технологической составляющих является выраженной на всех этапах жизненного цикла. Каждый из этапов имеет свою специфику, отражающуюся, в том числе, в наборе и значимости ESG-факторов, а также S-, W-, O- и T-категорий. Например, если на этапе поиска и разведки месторождения вопросы социально-экономического развития территории не играют значительной роли, то на всех этапах, начиная со строительства и ввода в эксплуатацию предприятия, их влияние на результаты функционирования природно-технологической системы значительно выше. Вопросам поиска оптимальных решений в части проектирования и управления предприятиями, в том числе вопросам эколого-территориального (ESG) подхода в этой деятельности, посвящены работы значительного числа исследователей [11–17].

Внешние факторы / Внутренние факторы	Возможности (O). Открывающиеся внешние возможности для решения задач: $O_1, O_2, O_3, ..., O_n$	Угрозы (T). Внешние факторы, потенциально опасные для успешного функционирования производства: $T_1, T_2, T_3, ..., T_n$
Сильные стороны (S). Конкурентные преимущества в технологической, экономической, экологической, управленческой и социальной сферах: $S_1, S_2, S_3, ..., S_n$	SO: выработка стратегий по использованию сильных сторон (S) в условиях открывающихся возможностей (O)	ST: выработка стратегий по использованию сильных сторон (S) для избежания или преодоления влияния потенциально опасных внешних факторов (T)
Слабые стороны (W). Точки уязвимости с позиций технологии, экологии, положения на рынке, а также в управленческой и социальной сферах: $W_1, W_2, W_3, ..., W_n$	WO: выработка стратегий по использованию открывающихся возможностей (O) для преодоления слабых сторон организации (W)	WT: выработка стратегий, позволяющих минимизировать слабости и недостатки (W) при одновременном избежании или преодолении угроз (T)

Рисунок 2. Общий вид матрицы SWOT-анализа
Figure 2. An overview of the SWOT analysis matrix

Далее излагаются результаты исследования возможности совместного использования ESG-подхода и SWOT-анализа для оптимального решения задач проектирования и управления деятельностью предприятия минерально-сырьевого комплекса.

Порядок проведения исследования. Представим совокупности экологических E, социальных S и управленческих G факторов на примере типового предприятия минерально-сырьевого комплекса в виде пересекающихся множеств.

Элементы множества E представляют собой совокупность экологических параметров предприятия, элементы множества S – совокупность параметров социальной сферы, множества G – управленческих параметров.

При изменении качественных и количественных характеристик элементов из области пересечения происходит изменение общих функциональных характеристик множеств E, S и G. Область пересечения множеств E, S и G применительно к природно-технологической системе минерально-сырьевого комплекса является областью наиболее вероятного нахождения оптимального решения ее задач. Важным при этом являются: определение E, S и G факторов; принадлежности их к области пересечения; взаимосвязи между ними в рассматриваемой области для выработки оптимальных стратегий. Предлагается решать эти задачи, используя SWOT-анализ. Поясним на примере, для типового предприятия минерально-сырьевого комплекса выявим S-, W-, O- и T-факторы.

S-факторы (сильные стороны): S_1 – применение новых технологий добычи и обогащения; S_2 – комплексная переработка минерального сырья; S_3 – готовность руководства компании к решению социальных и экологических задач; S_4 – достаточная обеспеченность сырьем.

W-факторы (слабые стороны): W_1 – высокая капиталоемкость производства; W_2 – усложнение горно-технических условий; W_3 – наличие отработанного нерекультивированного карьера; W_4 – отсутствие мест рекреации в районе предприятия.

O-факторы (возможности): O_1 – высокий уровень цен на добываемое полезное ископаемое; O_2 – возможность развития профессиональных контактов с предприятиями отрасли; O_3 – возможность привлечения внешних финансовых средств для решения проблем предприятия; O_4 – имеющийся опыт успешных горных предприятий в части обучения персонала; O_5 – возможность перевода земель из одной категории земельного фонда в другую.

T-факторы (угрозы): T_1 – ужесточение природоохранного законодательства; T_2 – риск дефицита на рынке оборудования; T_3 – угроза санкций; T_4 – риск повышения цен на электроэнергию.

Для совместного использования ESG-подхода и SWOT-анализа при проектировании и управлении природно-технологическими системами минерально-сырьевого комплекса предлагается выполнять поиск SO-, ST-, WO- и WT-стратегий с помощью трех SWOT-матриц (рис. 3). Результатами использования трех указанных SWOT-матриц будут три множества SO-, SW-, WO- и WT-стратегий по критериям E, S и G, область пересечения которых – множество [ESG], содержащее стратегии, ведущие к достижению определенного результата, отвечающего трем критериям одновременно (рис. 4).

К примеру, применяя SWOT-матрицу по критерию E, находим с использованием фактора W_3 (наличие отработанного нерекультивированного карьера) и фактора T_1 (ужесточение природоохранного законодательства) WT-стратегию: рекультивация отработанного карьера с целью соответствия природоохранному законодательству. Далее, применяя SWOT-матрицу по критерию S, находим с использованием фактора W_4 (отсутствие мест рекреации в районе предприятия) и фактора O_1 (наличие мирового опыта проведения рекреационной рекультивации) WO-стратегию: использование мирового опыта решения вопросов рекреации работников. Наконец, применяя SWOT-матрицу по критерию G, находим с использованием

фактора S_3 (готовность руководства компании к решению социальных и экологических задач) и O_3 (возможность привлечения внешних финансовых средств для решения проблем предприятия), а также O_5 (возможность перевода земель из одной категории земельного фонда в другую) SO-стратегию по фактору G: направление руководством компании финансовых средств для создания рекреационной зоны. Таким образом, комбинация стратегий, полученных с помощью совместного использования SWOT-анализа и ESG-подхода, привела к нахождению решения задачи, важной для E- и S- сфер с помощью сферы G – принятия управленческих решений, а именно: рекультивация отработанного карьера с созданием рекреационной зоны (рекреационное направление рекультивации нарушенных земель).

а

Внешние факторы / Внутренние факторы	$O_1, O_2, O_3, \ldots, O_n$	$T_1, T_2, T_3, \ldots, T_n$
$S_1, S_2, S_3, \ldots, S_n$	Поиск SO-стратегий по критерию «E»	Поиск ST-стратегий по критерию «E»
$W_1, W_2, W_3, \ldots, W_n$	Поиск WO-стратегий по критерию «E»	Поиск WT-стратегий по критерию «E»

б

Внешние факторы / Внутренние факторы	$O_1, O_2, O_3, \ldots, O_n$	$T_1, T_2, T_3, \ldots, T_n$
$S_1, S_2, S_3, \ldots, S_n$	Поиск SO-стратегий по критерию «S»	Поиск ST-стратегий по критерию «S»
$W_1, W_2, W_3, \ldots, W_n$	Поиск WO-стратегий по критерию «S»	Поиск WT-стратегий по критерию «S»

в

Внешние факторы / Внутренние факторы	$O_1, O_2, O_3, \ldots, O_n$	$T_1, T_2, T_3, \ldots, T_n$
$S_1, S_2, S_3, \ldots, S_n$	Поиск SO-стратегий по критерию «G»	Поиск ST-стратегий по критерию «G»
$W_1, W_2, W_3, \ldots, W_n$	Поиск WO-стратегий по критерию «G»	Поиск WT-стратегий по критерию «G»

Рисунок 3. Общий вид SWOT-матриц поиск стратегий по критериям: *а* – E; *б* – S; *в* – G
Figure 3. An overview of SWOT matrices for strategy search by criteria: *а* – E; *б* – S; *в* – G

В приведенном простом примере мы ограничились лишь небольшим рядом типовых факторов для иллюстрации идеи. Предложенный подход на каждом из этапов жизненного цикла предприятия минерально-сырьевого комплекса будет иметь свои отличительные черты, обусловленные спецификой этапа, технологическими, геологическими, экономическими, экологическими и социальными особенностями, а также взаимосвязями между ними. Варианты комбинаций стратегий могут быть разными, но общий подход – это совмещение в каждой комбинации SWOT-стратегий по критериям E, S и G. При выявлении большего количества различных внешних и внутренних факторов количество возможных комбинаций факторов и стратегий также будет расти. С использованием цифровых технологий возможно перебирать множества вариантов по совокупности ESG-критериев до нахождения тех, которые отвечают требуемому уровню решений. Предложенный алгоритм может использоваться предприятиями минерально-сырьевого комплекса, например, при разработке стратегии развития.

Заключение. По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

Актуальность поиска новых подходов и методов оптимального решения многоплановых взаимосвязанных эколого-технологических и технико-экономических задач в меняющихся условиях как при проектировании освоения месторождений, так и в процессе их разработки возрастает с ростом потребления минеральных ресурсов и прогнозируемого спроса на них.

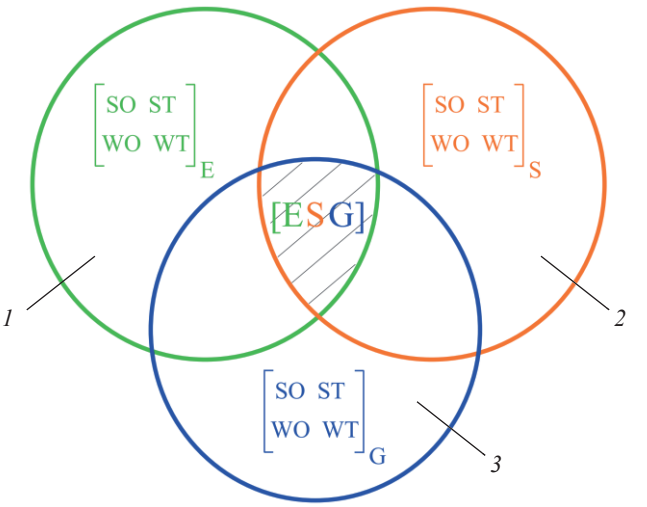

Рисунок 4. Множество [ESG] – наиболее вероятная область нахождения стратегий оптимального решения задач проектирования и управления природно-технологической системой минерально-сырьевого комплекса: *1*, *2*, *3* – множество стратегий по критерию E, S, G, соответственно

Figure 4. An ESG set is the most likely area for finding strategies for optimal solutions to natural-technological systems design and management in the mineral resource complex: *1*, *2*, *3* – a set of strategies by E, S, G criteria, respectively

Существующие исследования в разных отраслях знаний предлагают решения той или иной степени эффективности для широкого спектра отдельных задач различной природы, решаемых как предприятиями минерально-сырьевого комплекса на протяжении их деятельности, так и территориальными образованиями, в границах которых происходит освоение месторождения. При этом потребность в новых, отвечающих вызовам времени, подходах, ориентированных на совместное решение комплекса подобных задач, не снижается.

В свете сказанного для повышения эффективности решения комплекса эколого-технологических, эколого-территориальных и производственно-социальных задач в меняющихся горно-геологических, экономических, социальных и природных условиях авторами предлагается не применявшееся ранее комбинированное использование инструментов стратегического планирования (SWOT-анализ) и оценки деятельности компаний с точки зрения экологических, социальных и управленческих факторов (ESG-анализ), формализуется общий алгоритм решения в рамках комплексного эколого-территориального подхода к обеспечению техносферной безопасности в районах функционирования предприятий минерально-сырьевого комплекса. При этом специфика различных этапов жизненного цикла предприятия

и внешних условий будет отражаться, в том числе, в наборе и значимости ESG-факторов, а также S-, W-, O- и T-категорий, которые различаются на каждом из этапов, что необходимо учитывать при практическом применении алгоритма.

Неуклонное развитие цифровых технологий, дающих возможность обрабатывать большие массивы данных, характерных для предприятий минерально-сырьевого комплекса и горнопромышленных территорий, позволяет развивать геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении недр с расширением круга решаемых на основе предложенного алгоритма задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грачев В. А. Учение В. И. Вернадского о ноосфере как основа устойчивого развития // Юг России: экология, развитие. 2015. № 10(3). С. 16–23. DOI: 10.18470/1992-1098-2015-3-16-23

2. Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Berens III W. W. The limits to growth. New York: Universe books, 1972. 208 p.

3. Кричкер Д. Р., Хазин М. Л. Экономические аспекты агротехнического (биологического) этапа рекультивации нарушенных земель горнорудных предприятий Уральского макрорегиона и потенциал его воздействия на социально-экономическую обстановку в моногородах // Известия УГГУ. 2022. Вып. 3(67). С. 163–172. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-3-163-172

4. Reichl C., Schatz M. World Mining Data 2024 // Minerals Production. 2024. Vol. 39. 265 p. URL: https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD%202024.pdf (дата обращения: 15.07.2025)

5. World Population Prospects 2024 Summary of Results. NY: United Nations, 2024. URL: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/files/documents/2024/Jul/wpp2024_summary_of_results_final_web.pdf (дата обращения: 18.06.2025)

6. Исмаилов Т. Т., Комащенко В. И., Голик В. И. Техногенное воздействие на природно-технические геосистемы // ГИАБ. 2009. № 4. С. 276–278.

7. Суздалева А. Л. Системная техноэкология и управляемые природно-технические системы // Безопасность в техносфере. 2016. Т. 5. № 3. С. 6–14.

8. Корнилков С. В., Рыбников П. А., Рыбникова Л. С. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2025. Т. 67. № 1. С. 76–85. DOI: 10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85

9. Zahid Hussain, Jiajie Li, Jianxin Fu, Zhengxing Yu, Siqi Zhang, Sitao Zhu, Wen Ni, Michael Hitch. Innovative approach to green mining: Integration of drone technology, GIS, and ERT for basalt extraction and CO_2 storage in Bagrote Valley, Gilgit-Baltistan, Pakistan // Green and Smart Mining Engineering 2025. Vol. 2. Iss. 2. P. 208–220. DOI: 10.1016/j.gsme.2025.06.004

10. Смотрова Т. И., Наролина Т. С., Пургаева И. А., Некрасова Т. А. ESG-трансформация российских предприятий // Современная экономика: проблемы и решения. 2022. № 11(155). С. 60–73. DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2022/11/60-73

11. Трубецкой К. Н., Захаров В. Н., Галченко Ю. П. Природоподобные и конвергентные технологии при освоении минеральных ресурсов литосферы // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 6. С. 560–566. DOI: 10.31857/S0869587320050102

12. Alejandra Vera-Burau, Lluís Sanmiquel Pera, Marc Bascompta Massanes. Integration of quantitative ESG factors in a mining project: Case studies of a quarry // Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 501. Art. 145304. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145304

13. Consuelo Garcia-Zavala, Carlos M. Ordens, Liliana Pagliero, Éléonore Lèbre, Douglas Aitken, Martin Stringer. An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: The case of Chile // The Extractive Industries and Society. 2023. Vol. 14. Art. 101259. DOI: 10.1016/j.exis.2023.101259

14. Megan J. Cole. ESG risks to global platinum supply: A case study of Mogalakwena Mine, South Africa // Resources Policy. 2023. Vol. 85. Part B. Art. 104054. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104054

15. Valiev N. G., Razorenov Iu. I., Belododev A. A., Maslennikov S. A., Shokhov S. O. Combining the stages of mineral deposits development // Minerals and Mining Engineering. 2024. No. 5. P. 55–63. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-55-63

16. Яковлев В. Л., Корнилков С. В., Соколов И. В. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья / под ред. член-корр. РАН В. Л. Яковлева. Екатеринбург: УрО РАН, 2018. 360 с.

17. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Горнопромышленная гидрогеология на постэксплуатационном этапе. Екатеринбург: УрО РАН, 2025. 248 с.

Поступила в редакцию 18 июля 2025 года

Сведения об авторах:

Студенок Геннадий Андреевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии Уральского государственного горного университета. E-mail: genand@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6958-5444
Хохряков Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, эксперт-консультант ООО «Инженерные изыскания». E-mail: avx09@mail.ru
Фролов Сергей Георгиевич – кандидат технических наук, доцент, декан факультета геологии и геофизики, заведующий кафедрой технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: sergey.frolov@m.ursmu.ru; 0000-0003-1112-4212
Старцев Василий Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Уральского государственного горного университета. E-mail: starcev.1992@list.ru; https://orcid.org/0009-0008-7562-5191

DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-36-47

Scientific foundations of an ecological-territorial approach to the design and management of natural-technological systems in the mineral resource complex

Gennadii A. Studenok[1], Aleksandr V. Khokhriakov[2], Sergei G. Frolov[1], Vasilii A. Startsev[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.
[2] OOO Inzhenernye izyskaniia, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Mineral extraction keeps steadily growing both in Russia and all over the world. This trend will likely continue in the foreseeable future, driven by population growth and increasing demand for mineral resources. Design and management of a mining enterprise as a natural-technological system within the mineral resource complex is a multifunctional activity that involves technological, geological, environmental, economic, and social components, therefore requiring an interdisciplinary approach. This article examines a combination of ESG concept and SWOT analysis as an option for implementing such an approach.*

Methods of research. *The existing concepts for representing and describing natural-technological systems have been analyzed as well as approaches to their design and management in the changing operational conditions of the extractive industries. The practice of implementing the principles of joint technological, environmental, social, and corporate management in other industries has been examined and evaluated. Analytical and synthesis methods have been used to develop a scientific and practical approach to applying these principles, which is aimed at challenges the mining industry is facing.*

Results and discussion. *An algorithm for finding optimal solutions to complex, interconnected environmental-technological, environmental-territorial, and production-social issues has been formulated based on the combination of the ESG approach (based on a set of core principles of joint, equal consideration of environmental, social, and managerial aspects in companies' activities when making technological, structural, and investment decisions) and SWOT analysis (a strategic planning method used to assess internal and external factors that influence a company's development). The feasibility and potential of this algorithm for companies in the mineral resources sector has been assessed.*

Conclusions. *For the first time, a combined application of ESG analysis (a company's assessment based on its environmental, social, technical, economic, and managerial indicators) and SWOT analysis tools has been proposed for addressing a range of environmental-technological, environmental-territorial, and production-social issues. The potential for the proposed algorithm increases with the development of digital technologies that enable large data sets processing. That is particularly relevant for mineral resource companies, which are territorially link to mineral deposits and have a direct or indirect impact on the territory's diverse resource potential, including human capital, natural resources, infrastructure, energy, and other resources.*

Keywords: *natural-technological systems; mineral resource complex; ESG principles; SWOT analysis; environmental-territorial approach.*

The research was carried out *(the possibility of applying GIS to solve the assigned tasks was analyzed) within the state assignment no. 075-00410-25-00, reg. no. 125070908250-1. (FUWE-2025-0002)*

REFERENCES

1. Grachev V. A. Vernadsky's V. I. theory of noosphere as the basis for sustainable development. *Iug Rossii: ekologiia, razvitie = South of Russia: Ecology, Development.* 2015; 10(3): 16–23. (In Russ.) Available from: doi: 10.18470/1992-1098-2015-3-16-23

2. Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Berens III W. W. *The limits to growth.* New York: Universe books, 1972.

3. Krichker D. R., Khazin M. L. Economic aspects of the agrotechnical (biological) stage of reclamation of disturbed lands of mining enterprises of the Ural macroregion and the potential of its impact on the socio-economic situation in single-industry towns. *Izvestiia Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University.* 2022; 3(67): 163–172. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/2307-2091-2022-3-163-172

4. Reichl C., Schatz M. World Mining Data 2024. *Minerals Production.* 2024; 39. Available from: https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD%202024.pdf [Accessed 15 July 2025]

5. World Population Prospects 2024 Summary of Results. NY: United Nations, 2024. Available from: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/files/documents/2024/Jul/wpp2024_summary_of_results_final_web.pdf [Accessed: 18 September 2025]

6. Ismailov T. T., Komashchenko V. I., Golik V. I. The technogenic influence on the natural and technical geosystems. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2009; 4: 276–278. (In Russ.)

7. Suzdaleva A. L. System technoecology and managed nature-technical systems. *Bezopasnost v tekhnosfere = Safety in Technosphere.* 2016; 5(3): 6–14. (In Russ.)

8. Kornilkov S. V., Rybnikov P. A., Rybnikova L. S. Main directions in combining digitization and geoinformation methods for supporting mining production. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiia i razvedka = Proceeding of Higher Educational Establishments. Geoecology and Exploration.* 2025; 67(1): 76–85. (In Russ.) Available from: doi: 10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85

9. Zahid Hussain, Jiajie Li, Jianxin Fu, Zhengxing Yu, Siqi Zhang, Sitao Zhu, Wen Ni, Michael Hitch. Innovative approach to green mining: Integration of drone technology, GIS, and ERT for basalt extraction and CO_2 storage in Bagrote Valley, Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Green and Smart Mining Engineering*. 2025; 2(2): 208–220. Available from: doi: 10.1016/j.gsme.2025.06.004

10. Smotrova T. I., Narolina T. S., Purgaeva I. A., Nekrasova T. A. ESG-transformation of Russian enterprises. *Sovremennaia ekonomika: problemy i resheniia = Modern Economics: Problems and Solutions.* 2022; 11(155): 60–73. (In Russ.) Available from: doi: 10.17308/meps/2078-9017/2022/11/60-73

11. Trubetskoi K. N., Zakharov V. N., Galchenko Iu. P. Nature-like and convergent technologies in the development of mineral resources of the littosphere. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences.* 2020; 90(6): 560–566. (In Russ.) Available from: doi: 10.31857/S0869587320050102

12. Alejandra Vera-Burau, Lluís Sanmiquel Pera, Marc Bascompta Massanes. Integration of quantitative ESG factors in a mining project: Case studies of a quarry. *Journal of Cleaner Production.* 2025; 501: 145304. Available from: doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145304

13. Consuelo Garcia-Zavala, Carlos M. Ordens, Liliana Pagliero, Éléonore Lèbre, Douglas Aitken, Martin Stringer. An approach for prioritising environmental, social and governance (ESG) water-related risks for the mining industry: The case of Chile. *The Extractive Industries and Society.* 2023; 14; 101259. Available from: doi: 10.1016/j.exis.2023.101259

14. Megan J. Cole. ESG risks to global platinum supply: A case study of Mogalakwena Mine, South Africa. *Resources Policy.* 2023; 85(Part B): 104054. Available from: doi: 10.1016/j.resourpol.2023.104054

15. Valiev N. G., Razorenov Iu. I., Belodedov A. A., Maslennikov S. A., Shokhov S. O. Combining the stages of mineral deposits development. *Minerals and Mining Engineering.* 2024; 5: 55–63. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2024-5-55-63

16. Iakovlev V. L. (ed.), Kornilkov S. V., Sokolov I. V. *An innovation base for the strategy of integrated development of mineral resources*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2018. (In Russ.)

17. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. *Mining geohydrology at the post-exploitation stage.* Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2025. (In Russ.)

Received 18 June 2025

Information about the authors:

Gennadii A. Studenok – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Ecology, Ural State Mining University. E-mail: genand@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-6958-5444
Aleksandr V. Khokhriakov – DSc (Engineering), Professor, consulting expert of OOO Inzhenernye izyskaniia. E-mail: avx09@mail.ru
Sergei G. Frolov – PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Geology and Geophysics, Head of the Department of Technology and Technique of Mineral Deposits Prospecting, Ural State Mining University. E-mail: sergey.frolov@m.ursmu.ru; 0000-0003-1112-4212
Vasilii A. Startsev – PhD (Engineering), Department of Mining, Ural State Mining University. E-mail: starcev.1992@list.ru

Для цитирования: Студенок Г. А., Хохряков А. В., Фролов С. Г., Старцев В. А. Научные основы эколого-территориального подхода к проектированию и управлению природно-технологическими системами в минерально-сырьевом комплексе // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2025. № 5. С. 36–47. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-36-47
For citation: Studenok G. A., Khokhriakov A. V., Frolov S. G., Startsev V. A. Scientific foundations of an ecological-territorial approach to the design and management of natural-technological systems in the mineral resource complex. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2025; 5: 36–47 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-36-47