

Критерии и методы оценки экологической эффективности недропользования при устойчивом развитии

Ю. П. Галченко✉, Е. Д. Якушева

ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова»

Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация

✉ schtrek33@mail.ru

Резюме. Представлена новая методика количественной оценки экологической эффективности комплексного освоения недр с учетом ограничений и принципов устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса. Показано, что неуправляемое обострение экологического кризиса, порожденного системным антагонизмом между человеком и биосферой, в условиях очевидной необходимости сохранения природной среды как гарантии выживания будущих поколений постепенно меняет вектор развития общества в направлении повышения значимости экологического императива как в общих принципах, так и в локальных методах построения техносферы. Установлено, что опережающий рост экологических проблем в сфере недропользования связан не только с очевидным несоответствием между темпами потребления различных металлов и геологически обусловленным снижением доступности минеральных ресурсов недр, но и главным образом с полным отсутствием побудительных технико-экономических мотивов и биологически обоснованных стимулов поиска инновационных путей экологизации технологической парадигмы как техносферы в целом, так и недропользования в частности. Предложены теория и методология преодоления этих противоречий на основе замены сугубо монетарного подхода к оценке экологических последствий техногенного изменения недр на биологически значимые критерии и методы, соответствующие требованиям и ограничениям принятой ООН Концепцией устойчивого развития природы и общества и действующей экологической доктрины РФ.

Ключевые слова: освоение недр, экологический кризис, сохранение биоты, экологизация парадигмы, стимулирование, обоснование, методология, дифференцированные критерии, методики, недропользование, устойчивое развитие, экологическая эффективность

Финансирование: Статья написана в рамках базового бюджетного финансирования (FMMS-2024-0010).

Для цитирования: Галченко Ю.П., Якушева Е.Д. Критерии и методы оценки экологической эффективности недропользования при устойчивом развитии. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 59-64. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-59-64>.

Criteria and methods for assessing the environmental efficiency of subsurface use in a sustainable manner

Yu. P. Galchenko✉, E. D. Yakusheva

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russian Federation

✉ schtrek33@mail.ru

Abstract. The article presents a new methodology for quantifying the environmental efficiency of integrated subsurface development, taking into account the limitations and principles of sustainable development of the mineral resource complex. It is shown that the uncontrollable aggravation of the ecological crisis generated by the systemic antagonism between man and the biosphere, in conditions of the obvious need to preserve the natural environment as a guarantee of the survival of future generations, gradually changes the vector of development of society in the direction of increasing the importance of the ecological imperative, both in general principles and in local methods of building the technosphere. It has been established that the outstripping growth of environmental problems in the field of subsurface use is associated not only with the obvious discrepancy between the rates of consumption of various metals and the geologically caused decrease in the availability of mineral resources of the subsurface, but also, mainly, with the complete absence of motivating technical and economic motives and biologically justified incentives to search for innovative ways of greening the technological paradigm of both the technosphere as a whole and subsurface use, in particular. A theory and methodology for overcoming

ing these contradictions are proposed based on replacing a purely monetary approach to assessing the environmental consequences of man-made changes in the subsurface with biologically relevant criteria and methods that meet the requirements and limitations of the UN Concept of Sustainable Development of Nature and Society and the current Environmental Doctrine of the Russian Federation.

Keywords: subsurface development, ecological crisis, biota conservation, ecologization of the paradigm, stimulation, justification, methodology, differentiated criteria, methods, subsurface use, sustainable development, environmental efficiency

Financial support: The article was written within the framework of basic budget financing (FMMS-2024-0010).

For citation: Galchenko Yu.P., Yakusheva E.D. Criteria and methods for assessing the environmental efficiency of subsurface use in a sustainable manner. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-59-64>.

Введение

Необратимое преобразование живой природы хозяйствующим человеком становится с каждым годом все более разрушительным как по форме, так и по содержанию. Доминирующая сегодня идеология безграничного роста потребления вместе с исключительно монетарными критериями оценки экологических последствий развития производства привела к трансформации текущего экологического кризиса в отдельных отраслях экономики в системный кризис геосфер, при котором антропосфера, созданная как среда обитания вида *Homo Sapiens*, поглощает ресурсы природных геосфер Земли значительно быстрее, чем реализуются возможности их естественного самовосстановления.

Экологический смысл этих процессов определяется особенностями эволюционного развития в составе естественной биоты Земли человека разумного как первого и единственного биологического вида, существующего вне природного баланса энергии Солнца. Именно благодаря разуму человек сформировал и занял абиотическую экологическую нишу, удовлетворяя потребности за счет частичного уничтожения естественной биоты Земли и формирования на этих территориях искусственных экосистем различного назначения, равновесных только при использовании труда человека и вещества, добытого из литосферы [1].

За истекшее столетие население Земли и площадь пашни синхронно увеличились почти в четыре раза, прирастая примерно на 3,11 % в год. За тот же период добыча вещества литосферы и производство энергии возросли в 18 раз с устойчивым приростом на 10–15 % в год [1–5]. Это означает, что интенсивный рост технократической цивилизации обеспечивается экстенсивным развитием минерально-сырьевого комплекса как материальной и энергетической основы этой цивилизации. Экологическое значение этого факта существенно возрастает ещё и потому, что до сих пор в обществе существует убеждение о том, что природу можно и надо преобразовывать и приспосабливать к интересам человека.

В целом природоёмкость промышленной и любой другой хозяйственной деятельности человека обычно не учитывается при количественных оценках этой деятельности, а экологическая опасность техногенных факторов определяется по остаточному принципу и исключительно по антропофильным критериям [5–8]. Именно поэтому сегодня постоянно ускоряющееся разрушение естественной биоты Земли происходит на фоне опережающего роста расходов технократического общества на ее сохранение, а любое увеличение потребления минерального сырья в антропосфере сопровождается избыточной техногенной нагрузкой на природу.

Попытки преодолеть эти фундаментальные противоречия монетаристическими методами в рамках экономического императива, которые регулярно предпринимаются в

решениях многочисленных экологических форумов различного масштаба, пока не дали сколько-нибудь заметных результатов. Поэтому сегодня, когда перед человечеством во весь рост встала проблема сохранения естественной биоты Земли как единственной гарантии собственного выживания, наличие показателей количественной оценки экологичности применяемых технологий (в том числе и горных) становится необходимым и обязательным условием разработки концепции экологического императива как идеологической основы перехода к устойчивому развитию недропользования на основе экологизации технологической парадигмы и перехода к конвергентным горным технологиям.

Цель исследований: научное обоснование и создание биологически значимых методов количественной оценки экологических последствий развития минерально-сырьевого комплекса.

Методические подходы

Вполне логично, что введение понятия устойчивого развития (*sustainable development*) как средства перспективного решения экологических проблем при развитии технократического общества сделало необходимым создание критериев оценки «экологической эффективности» применяемой технологической парадигмы антропосферы в целом, так и отдельных ее отраслей, соответствующих известному принципу Рёберта о консенсусе в отношении характера естественной поэтапной структуры как необходимому условию экологической устойчивости.

Из общей теории когнитивного резонанса известно, что пути и методы решения любой принципиально новой проблемы целесообразно искать в тех областях знаний, где аналогичные по смыслу и целям результаты уже получены [9]. Критериальной основой принятых подходов к проблеме является система показателей, отражающих либо степень опасности тех или иных техногенных факторов для здоровья человека, либо снижение эффективности производства [10–14]. В этом случае отсутствие методической возможности биологически адекватной экономической оценки степени техногенного поражения живой природы Земли вместе с не менее очевидной необходимостью существования такой оценки для регулирования взаимодействия биосферы и человека, обуславливают целесообразность разрешения этого противоречия на основе известного методического принципа Р. Фейнмана о «шаге в сторону» [15]. В условиях абсолютной доминанты экономического императива таким шагом могло бы стать обоснование и создание универсального, но не денежного подхода к оценке экологических последствий недропользования, как, впрочем, и любой другой промышленной деятельности.

Тогда смысловая основа методики стимулирования инновационного развития добывающих отраслей должна базироваться на двух фундаментальных положениях:

- создании и применении универсального критерия, обеспечивающего возможность как общей оценки результата, так и оценки каждой из составляющих его величин;
- применении унифицированной методики определения этого критерия для каждой конкретной производственной системы.

Результаты исследований

Планетарный масштаб развития минерально-сырьевого комплекса и геологическая заданность дислокации месторождений полезных ископаемых в литосфере сделали равновероятным появление добывающего предприятия в любой точке заселенной и незаселенной части суши нашей планеты. Одновременно эволюционно порожденный абиологический способ получения человеком вещества и энергии для биологического и инфраструктурного развития привел к фактическому формированию на поверхности суши трех типов экосистемных комплексов, принципиально различающихся как функциональной структурой биоты, так и содержанием понятия экологической безопасности техногенного воздействия.

Это означает, что при решении всех вопросов взаимодействия человека и природы необходимо учитывать фактически сложившееся деление биосферы суши на три различных типа экосистем, кардинально различающихся по целеполаганию:

- естественные экосистемы биосферы, не затронутые прямым антропогенным воздействием;
- искусственные сельскохозяйственные экосистемы, обеспечивающие пищевую базу существования человечества (так называемая вторая природа);
- искусственные экосистемы обитания человека, включающие в себя урбанизированные территории и техносферу.

В пределах каждого из этих функциональных типов экосистем устойчивое развитие обеспечивается путем использования трех операционных правил, известных как правила Дейли [17]:

Возобновляемые ресурсы биосферы должны использоваться не быстрее, чем они восстанавливаются.

Невозобновляемые ресурсы литосферы должны использоваться не быстрее, чем будут внедряться их возобновляемые аналоги.

Загрязняющие вещества и отходы должны поступать в геосферу Земли не быстрее, чем природные системы смогут их поглотить, переработать или обезвредить.

Именно такая, триединая, структура геонимической среды делает совершенно необходимым дифференцированный подход к созданию методики выбора и определения универсального экологического критерия в рамках единой концепции экологической безопасности технологий вообще, в первую очередь – горных технологий, обеспечивающих развитие минерально-сырьевого комплекса.

При освоении запасов месторождений, дислоцированных в пределах природно-равновесных экосистем естественной биоты Земли, конечной целью экологической защиты фактически является сохранение биологического разнообразия, которое может быть достигнуто через сохранение условий самовосстановления эдификаторной синусии фитоценоза

биоты в постэксплуатационный период. Любое горное производство в границах экосистем естественной биоты Земли неизбежно сопровождается полным разрушением их биоты на площади, занятой самим предприятием, и частичным поражением элементов биоты в зоне дистанционного действия техногенных факторов.

Для определения степени изменения состояния природных объектов в биологии принято использовать прямые или косвенные биоиндикаторы, а в сложных случаях – биоиндикаторные системы. Действующая классификация биоиндикаторов для единичных видов выделяет биоиндикаторы регистрирующие, а для биологических систем – аккумулятивные. Общими требованиями к используемому биоиндикатору являются: быстрая реакция, надежность, простота и мониторинговые возможности в виде постоянного присутствия в исследуемой системе [18, 19].

С учетом этих обстоятельств для типовой структуры техногенного воздействия горнодобывающих предприятий и особенностей транзита и депонирования техногенных факторов в различных типах экосистем в качестве универсального критерия для интегральной экологической оценки последствий работы горного предприятия можно предложить показатель техногенного поражения биоты B_n , отражающий, как площадь зоны техногенного поражения P_B , так и степень изменения состояния биоты на этой площади в виде величины индекса изменения I_B :

$$B_n = P_B \cdot I_B. \quad (1)$$

Обе величины определяются либо натурными изменениями по известным методикам пробных площадок и экологического профилирования с обработкой полученных данных флористическим методом Браун – Бланка [16, 20], либо по данным космического мониторинга [18, 21, 22].

В последнем случае величина индекса изменения биоты составит:

$$B_n = \pi \cdot r_n^2 \cdot \frac{K_{C_0} - K_{C_i}}{K_{C_0}}, [M^2], \quad (2)$$

где r_n – средний радиус зоны изменения коэффициента спектральной яркости от нулевого значения на границе земельного отвода, занятого поверхностным комплексом горного предприятия до эталонной K_{C_0} для данной фитоценоза;

K_{C_i} – среднее значение коэффициента спектральной яркости по площади P_B .

По внутреннему содержанию предлагаемый критерий B_n является частью косвенной аккумулирующей биоиндикаторной системы, которая может быть использована для количественной оценки экологических последствий разработки месторождений в пределах любого природно-территориального комплекса. Тогда отношение этой величины к количеству добытого в процессе освоения участка недр вещества литосферы $V_{вл}$ становится универсальным удельным биоиндикатором для экологической оценки конкретной горнотехнической системы.

В рамках гипотезы о коэволюционном взаимодействии природно-технических систем добычи минеральных ресурсов литосферы, развитой в работе [16], такой биоиндикатор можно трактовать как экологическую цену C_3 конечного продукта:

$$C_э = \frac{P_б \cdot I_б}{V_{бл}} \quad (3)$$

Учитывая типичную для горной промышленности стадийность отработки запасов месторождений твердых полезных ископаемых, экологическая цена всегда имеет статическую $C_{эс}$ и динамическую $C_{эд}$ составляющие, отражающие, соответственно, экологическую нагрузку на биоту на стадии вскрытия и отработки запасов месторождения:

$$C_{эс} = \frac{P'_б \cdot I'_б}{V_{бз}}, \quad (4)$$

где $P'_б$ – общая площадь отторжения земель биоты под создание поверхностного комплекса предприятия, м²;

$I'_б$ – индекс поражения биоты, ед.;

$V_{бз}$ – балансовые запасы месторождения, т.

Динамическая составляющая текущей экологической цены $C_{эд}$ определяется как отношение ежегодного прироста площади $P_{бг}$ и степени $I_{бг}$ техногенного поражения естественной биоты к годовой величине погашения балансовых запасов $A_{гб}$:

$$C_{эд} = \frac{P_{бг} \cdot I_{бг}}{A_{гб}} \quad (5)$$

Итоговая экологическая цена определится как сумма

$$C_э = C_{эс} + C_{эд} \left[\frac{м^2}{т} \right]. \quad (6)$$

Экологическая цена продукции горного предприятия, расположенного на площади, занятой сельскохозяйственными угодьями $C_{сх}$, определяется по форме, идентичной с естественной биотой, но имеет совершенно иное содержание используемых показателей.

Известно, что для систем «второй природы» содержание понятия экологической безопасности строится на регламентации уровня техногенных воздействий по показателям плодородия почвы как средства производства [23]. Поэтому в качестве универсального критерия при интегральной оценке техногенного воздействия предприятия сельскохозяйственного назначения («вторая природа») базируется на учете снижения хозяйственной ценности нарушаемой искусственной экосистемы, которая, в свою очередь, оценивается по величине балла плодородия $V_п$.

В практике используется несколько методов определения этого показателя, но наиболее распространенным является методика ЦИНАО [24–26].

Для данного типа экосистем величина универсального критерия $V_{сх}$ для экологической оценки их нарушения в процессе разработки месторождения отражает площадь сельскохозяйственных угодий $S_п$, на которой полностью или частично утрачено плодородие почв:

$$V_{сх} = \Delta V_п \cdot S_п, \quad (7)$$

где $\Delta V_п$ – диапазон изменения величины балла плодородия.

В такой постановке экологическая цена $C_{сх}$ единицы продукции горного предприятия, расположенного на сельскохозяйственных землях, определяется из выражения

$$C_{сх} = \frac{S_{пк} \cdot V_{п0}}{V_{бз}} + \frac{P_б \cdot (V_{п0} - V_{пi})}{A_{гб}}, \frac{ед.}{т}, \quad (8)$$

где $S_{пк}$ – площадь промплощадки рудника, м²;

$V_{п0}$ – исходная величина критерия плодородия;

$V_{пi}$ – фактическая величина критерия плодородия.

Взаимодействие добывающих предприятий с урбанизированной составляющей площади антропосферы не является типичным явлением при развитии минерально-сырьевого комплекса. Тем не менее такая вероятность существует как неизбежное следствие геологической предопределенности дислокации месторождений в земной коре.

Тогда, согласно работе [27], исходные данные для расчета экологической цены добытого сырья получают при проведении аудита площади поселения методом кругов устойчивости.

Заключение

1. Современная антропосфера как искусственная экологическая ниша, занимаемая человеком, функционирует в режиме интенсивного поглощения экосистем биосферы Земли с последующим созданием на этом месте сельскохозяйственных, селитебных и техносферных систем, экологическое равновесие в которых поддерживается за счет труда человека. Такое развитие антропосферы обеспечивается экстенсивным по своей организационной форме ростом объемов добычи различных видов минерального сырья из литосферы.

2. Выраженное несоответствие реальных целей природоохранной деятельности и критериев, применяемых для оценки ее результатов в сочетании с биосистемным антагонизмом человека и природы, привели к тому, что возрастающее разрушение биосферы Земли происходит на фоне более быстрого роста затрат общества на ее сохранение. В условиях рыночной экономики любые изменения применяемых технологий в интересах экологической безопасности неизбежно повышают издержки производства со всеми вытекающими отсюда последствиями.

3. Создан и предложен в виде показателя экологической цены конечного продукта немонетизированный критерий оценки интенсивности техногенного поражения биоты в процессе функционирования минерально-сырьевого комплекса техносферы. Использование этого показателя в сырьевых отраслях промышленности не только позволит ранжировать применяемые технологии по степени их экологической эффективности, но и дать побудительный стимул к поиску новых возможностей развития в направлении минимизации природоемкости добывающих отраслей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Галченко Ю.П. Человек как «геологическая сила» и перспективы геонимии. *Наука и общество в XX–XXI вв.: сборник научных трудов: Часть первая*. Москва, 2024: 210–237.
Galchenko Yu.P. Man as a «geological force» and the prospects of geonomy. *Science and Society in the XX–XXI centuries: Part one, Moscow*, 2024: 210–237. (In Russ.).
2. World Resources Record 2022 / World Resourced Institute. URL: <https://tools-wri.org/publication>.
3. Hodge R.A., Ericsson M., Lof O., et al. The global mining industry: corporate profile, complexity, and change. *Mineral Economics*. 2022; 35 (3–4): 587–606. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00343-1>.
4. World Energy Outlook 2024. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics>.
5. Михайлов В.Г. Обзор современных направлений обеспечения экологической безопасности. *Journal of Mining and Geotechnical engineering*. 2023; 1 (23): 71–91. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-1-71-97>.
Mikhailov V.G. Review of modern trends in environmental safety. *Journal of Mining and Geotechnical engineering*. 2023; 1 (23): 71–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-1-71-97>.
6. XXXII Моисеевские чтения: научно-практическая конференция «Система «УЧИТЕЛЬ» академика Н.Н. Моисеева и современная историческая обстановка: Философские, эколого-политологические и педагогические основания для научного анализа». Москва, 2025. URL: <https://mnepu-ras.ru>
XXXII Moiseev Readings – scientific and practical conference «The TEACHER system – Academician N.N. Moiseev and the modern historical situation: Philosophical, ecological, political and pedagogical foundations for scientific analysis». Moscow, 2025. (In Russ.). URL: <https://mnepu-ras.ru>
7. Туртыгина Н.А., Охрименко А.В., Фролов Н.А. Классификация способов стабилизации качества рудопотока при подземной добыче. *Рациональное освоение недр*. 2023; 4: 32–40. <https://doi.org/10.26121/RON.2023.51.61.002>.
Turtygina N.A., Okhrimenko A.V., Frolov N.A. Classification of methods for stabilizing the quality of ore flow during underground mining. *Rational development of the subsoil*. 2023; 4: 32–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.26121/RON.2023.51.61.002>.
8. United Nations «Global Sustainable Development Report (GSDR) 2023». United Nations Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development. URL: <https://sdgs.un.org/gsdrgsd2023>.
9. Хмылёв В.Л., Кондрасюк В.А. Коммуникативные стандарты интенсивности когнитивного резонанса. *Вестник Томского государственного университета*. 2015; 390: 66–72.
Khmylev V.L., Kondrasyuk V.A. Communicative standards of cognitive resonance intensity. *Bulletin of Tomsk State University*. 2015; 390: 66–72. (In Russ.).
10. Кричевский С.В. Экологическая история техники от технологий до техносферы. XX – начало XXI века. Методология, опыт, перспективы: монография. Москва, 2023: 367.
Krichevsky S.V. The ecological history of technology from technology to the technosphere. XX – the beginning of the XXI century. Methodology, experience, prospects: a monograph. Moscow, 2023: 367. (In Russ.).
11. Weiss M., Coelho V.N. Open pit mining operational planning using Multi Agent Systems. *Procedia Computer Science*. 2021; 192: 1677–1686. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.172>.
12. Джевага Н.В., Чухланцева Т.П. Промышленные отходы в горнодобывающей отрасли: современное состояние и пути решения проблем. *Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий: III Всероссийская научная конференция с международным участием*. Красноярск, 2022: 210–216.
Dzhevaga N.V., Chukhlantseva T.P. Industrial waste in the mining industry: current state and ways to solve problems. *III All-Russian scientific conference with international participation «Science, Technology, Society: environmental engineering in the interests of sustainable development of territories»*. Krasnoyarsk, 2022: 210–216. (In Russ.).
13. Волкова Н.П., Волкова А.А. Особенности реализации концепции устойчивого развития: проблемы и перспективы. *Вестник Московского университета*. Серия 12: Политические науки. 2023; 3: 32–48.
Volkova N.P., Volkova A.A. Features of the implementation of the concept of sustainable development: problems and prospects. *Bulletin of the Moscow University. Ser. 12. Political sciences*. 2023; 3: 32–48. (In Russ.).
14. Wang Z., Wang G., Ran T., et al. Assessment of soil fertility degradation affected by mining disturbance and land use in a coalfield via machine learning. *Ecological Indicators*. 2021; 125: 107608. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIN.2021.107608>.
15. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Москва, 1965: 110.
Feynman R., Leighton R., Sands M. Feynman lectures on Physics. Moscow, 1965: 110. (In Russ.).
16. Трубетцкой К.Н., Галченко Ю.П., Озарян Ю.А. Экологическая цена минерального сырья как потенциальный регулятор технологической парадигмы недропользования при устойчивом развитии. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021; 2: 396–409.
Trubetskoy K.N., Galchenko Yu.P., Ozaryan Yu.A. Ecological price of mineral raw materials as a potential regulator of the technological paradigm of subsurface use with sustainable development. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 2: 396–409. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-2-1-396-409>.
17. Пинтер Л., Харди П., Бартельмус П. Показатели устойчивого развития: предложения по дальнейшему развитию. 2005. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.1e6d4a20-690b0734-8507d283-74722d776562/https://www.iisd.org/system/files/publications/measure_indicators_sd_way_forw ard.pdf.
Pinter L., Hardy P., Barthelmus P. Indicators of sustainable development: proposals for further development. 2005. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.1e6d4a20-690b0734-8507d283-74722d776562/https://web.archive.org/web/20240708130031/https://www.iisd.org/system/files/publications/measure_indicators_sd_way_forward.pdf. (In Russ.).
18. Шуберт Р. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем. Москва, 2010: 320.
Schubert R. Bioindication of pollution of terrestrial ecosystems. Moscow, 2010: 320. (In Russ.).
19. Afum B.O., Ben-Awuah E.A. Review of models and algorithms for surface-underground mining potions and transitions optimization: Some lessons learn and the way forward. *Mining*. 2021; 1: 112–134.
20. Braun-Blanquet J. Pflanzensociologie. Wien; New-York, 1964: 135.
21. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Geoprgiadi A.G., et al. Environmental and Economic Indicators of Antronogenic Impacts on Water Resources in Russia and the World. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2020; 90 (4) :428–436. <https://doi.org/10.1134/S1019331620040103>.

22. Жарко В.О., Бартелев С.А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014; 11 (3): 159-170.
Zharko V.O., Bartelev S.A. Assessment of the recognizability of forest tree species based on satellite data on seasonal changes in their spectral and reflective characteristics. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2014; 11 (3): 159-170. (In Russ.).
23. Галченко Ю.П., Ерёмченко В.А. Природно-технические системы подземной разработки рудных месторождений на основе конвергентных горных технологий. Москва, 2023: 288.
Galchenko Yu.P., Eremenko V.A. Natural and technical systems of underground mining of ore deposits based on convergent mining technologies. Moscow, 2023: 288. (In Russ.).
24. Ганжара Н.Ф. Почвоведение. Москва, 2001: 392.
Ganzhara N.F. Soil Science. Moscow, 2001: 392. (In Russ.).
25. Ващенко Т.А., Миронычев К.А., Коничев В.С. Основы почвоведения, земледелия и агрохимии. Москва, 2013: 176.
Vashchenko T.A., Mironychev K.A., Konichev V.S. Fundamentals of soil science, agriculture and agrochemistry. Moscow, 2013: 176. (In Russ.).
26. Вальков В.Ф., Денисов Т.В., Казеев К.Ш. и др. Плодородие почв: экологические, социальные и почвенно-генетические особенности. Ростов-на-Дону, 2013: 301.
Valkov V.F., Denisov T.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Soil fertility: ecological, social, and soil-genetic features. Rostov-on-Don, 2013:301. (In Russ.).
27. James Paul, Andy Skerry. Auditing cities with the help of Sustainability Circles. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.1e6d4a20-69b0734-8507d283-74722d776563/https://www.researchgate.net/publication/287263249.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Юрий Павлович Галченко –
д-р технических наук, профессор, главный
научный сотрудник отдела горной экологии
Института проблем комплексного освоения
недр имени академика Н. В. Мельникова
Российской академии наук, г. Москва,
Российская Федерация

Yury P. Galchenko –
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of
the Department of Mountain Ecology, Institute of
Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian
Federation



Екатерина Дмитриевна Якушева –
ведущий инженер лаборатории геотехнологии
комплексного освоения месторождений
полезных ископаемых Института проблем
комплексного освоения недр имени академика
Н. В. Мельникова Российской академии наук, г.
Москва, Российская Федерация

Ekaterina D. Yakusheva –
Leading Engineer of the laboratory of
geotechnology of complex development of mineral
deposits, Institute of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of the Russian Academy of
Sciences, Moscow, Russian Federation

Критерии авторства:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей.

Contribution:

The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.02.2026

Поступила после рецензирования: 05.03.2026

Принята к публикации: 20.04.2026

Article info

Received: 06.02.2026

Revised: 05.03.2026

Accepted: 20.04.2026