

КРИТЕРИИ СИСТЕМНОЙ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИРОДНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

В. М. Аленичев

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

Аннотация: Разработка месторождений сопровождается опасными природными процессами и явлениями, происходящими в геопространстве. При отработке месторождения встречаются зоны с существенным отличием содержания, текстурных и физико-механических характеристик полезного ископаемого, гидрогеологических и технологических свойств горного массива от средних, принятых в качестве исходных при проектировании и обосновании внутренней структуры геотехнологии. Для сравнительной оценки изменения природно-технологических систем при недропользовании в различные периоды времени необходимо провести сравнительный анализ изменений её на предыдущих временных промежутках. Обоснован комплексный безразмерный аддитивный показатель, характеризующий фактическое изменение состояния системы по сравнению с предыдущим этапом или «эталонным». При разности показателей в интервале 4–5 % изменения считаются несущественными, и текущее состояние системы характеризуется как устойчивое. При отклонениях более чем на 20 % изменения в горно-технологической системе существенны, и требуются новые решения: составление проекта реконструкции, доработки, ликвидации и консервации горных выработок или технического перевооружения. При значениях показателя в интервале 5–20 % варианты, стабилизирующие функционирование природно-технологической системы, обосновываются лицом, принимающим решение.

Ключевые слова: горно-технологическая система, состояние, показатели вариации, комплексный аддитивный показатель, алгоритм, оценка изменения.

Благодарность: Работа выполнена в соответствии с госзаданием ГР № АААА-А19 119020790024–7.

Для цитирования: Аленичев В. М. Критерии системной оценки изменений природно-технологических систем при недропользовании // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 207–216. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_207.

Criteria for system assessment of changes in natural and technological systems in subsurface use

V. M. Alenichev

Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: Mining mining is accompanied by hazardous natural processes and phenomena in geospace. Mineral mining operations intersect zones with significantly different contents,

textures and physical and mechanical characteristics of mineral, and hydrogeological and engineering properties of rock mass, which deviate from the average values taken as the source data in the design and substantiation of the internal structure of Geotechnology. For the comparative assessment of changes in natural and technological systems in subsurface use in different periods of time, it is necessary to undertake the comparative analysis of changes in it in the previous time periods. An integrated dimensionless additive indicator is justified for characterizing the actual change in the condition of the system as compared with the previous stage or a reference standard. When deviation is 4–5 %, the changes are considered as insignificant and the current condition of the system is assumed as stable. With deviations by more than 20%, the changes in the mining and technological system are significant and new engineering solutions are required: a project development for modernization, finalization, abandonment or closure of mine, or its re-equipment. If the value of the indicator is in the range of 5–20 %, the options that stabilize the functioning of the natural and technological system are justified by a decision-maker.

Key words: mining and technological system, condition, deviation, integrated additive indicator, algorithm, change estimation.

Acknowledgements: The study is carried out under State Contract No. AAAA-A19-119020790024-7.

For citation: Alenichev V. M. Criteria for system assessment of changes in natural and technological systems in subsurface use. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):207–216. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_207.

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых является причиной возникновения опасных природных процессов и явлений, сопоставимых с природными катастрофами, а иногда и землетрясениями высоких магнитуд. Подобные ситуации обусловлены происходящими в геопространстве геомеханическими процессами, тесно связанными с разрушением горных выработок и производственных объектов. По мере отработки месторождения встречаются зоны с существенным отличием содержания полезного ископаемого и его текстурных характеристик, физико-механических, гидрогеологических и технологических свойств горного массива от средних, принятых в качестве исходных при проектировании горнодобывающего предприятия и обосновании внутренней структуры геотехнологии.

Обзорная часть

Изменения природных систем, связанные с трансформацией их структуры

и функционирования, оцениваются критериями, учитывающими пространственную дифференциацию по величине нарушения среды и скорости происходящих во времени и пространстве процессов [1, 2, 3]. Первые исследования по влиянию техногенных процессов и явлений на геологическую среду были направлены на выявление видов хозяйственной деятельности, совокупности определенных воздействий и их параметров. По мере развития и внедрения мониторинга изучались результаты воздействий в зависимости от времени, направленности, площади и других факторов, а также их увязка с изменением природных физических полей [4, 5].

В современных условиях горнопромышленный комплекс выступает одним из основных источников создания экологических проблем, требующих постоянного проведения мониторинга геотехногенных структур, совершенствования технологических процессов при разработке месторождений твердых полезных ископаемых и детального изучения гидрогеологических

и геокриологических режимов [2, 6 – 8]. В процессе разработки месторождений полезных ископаемых происходят изменения состояния недр, приводящие в некоторых случаях к последствиям, сопоставимыми с природными катастрофами, а иногда и к землетрясениям высоких магнитуд [5, 6]. При недропользовании причинами изменения горно-геологических и геотектонических условий являются [7, 8]:

- наличие гетерогенных зон, что представляет собой всеобщую закономерность, присущую процессу образованию месторождений твердых полезных ископаемых;

- изменения трещиноватости и физико-механических свойств пород в окружающем геотехногенном пространстве;

- деформации горного массива в приконтурных зонах выработанного пространства;

- появление и развитие оползней, мульд оседания и сдвижения из-за изменения гидродинамических режимов подземных вод, активизации эндогенных процессов и т. п.

В качестве индикаторов при мониторинге геотехногенной структуры выбор параметров, показателей и свойств, характеризующих изменение горно-геологических и горнотехнических условий, производится исходя из следующих требований [9 – 12]:

- информативностью признака о состоянии среды и техногенного объекта (образования) при недропользовании;

- возможностью технологической регистрации признака в режиме реального времени;

- целесообразностью использования выбранных характеристик для оценки изменений состояния недр.

Объектами наблюдений и анализа при мониторинге прогнозируемых изменений являются:

- месторождение твердых полезных ископаемых;

- геотехногенные образования (карьер, шахта, отвалы, хвосто- и водохранилища);

- территории, не связанные с недропользованием и испытывающие воздействие хозяйственной деятельности;

- подземные воды с различными гидродинамическими режимами.

Совокупность большинства вышеуказанных объектов представляет собой геотехногенную структуру, включающую природный геологический объект и техногенные образования (карьер, шахта, отвалы, хвостохранилище и т. п.).

Горно-технологическая система, представляющая собой единое целое, безусловно, должна характеризоваться интегральными критериями. Оценка состояния среды при природопользовании зачастую проводится с использованием покомпонентных индикаторов, поскольку обоснование комплексного показателя — задача достаточно сложная. Из известных оценочных показателей — прямых, косвенных и индикаторных — практически используются последние для характеристики состояния геолого-технологических объектов, техногенные образования, поверхностные и подземные воды, горный массив под фундаментами и т. п.

Следует отметить, что описать полное состояние и трансформацию сложного образования, какими являются геосистемы, с точки зрения объективного подхода достаточно трудоемко и практически недостижимо. Поэтому наряду с комплексными критериями для оценки состояния систем целесообразно применять покомпонентные показатели (индикаторы), отражающие их специфические особенности в границах природных комплексов. В последнее время в ИГД УрО РАН

обосновано их применение для оценки в интегральном виде состояний и динамики изменения техногенных образований, рабочей зоны карьера, элементов систем разработки и т. п.

Исходя из принципа целостности геотехногенной структуры выбор и обоснование критериев оценки состояния объекта и его трансформации при недропользовании должен проводиться с учетом большого числа показателей, характеризующих основные свойства объекта. Процедура обоснования комплексного показателя, учитывающего основные параметры и показатели, следует уделить особое внимание, поскольку их дальнейшее использование при интегральной оценке изменений природно-технологической системы предпочтительнее. Это касается, например, определения предельно допустимой нагрузки (ПДН) на ландшафты с учетом антропогенных и естественных факторов изменения среды при ведении взрывных работ и кучном выщелачивании золота и цветных металлов.

Таким образом, оценочный показатель, определяющий степень трансформации структуры и её функционирования будет объективен в том случае, если он учитывает пространственную изоляцию нарушенных участков и динамику варьирования их во времени. Это прежде всего относится к оценке изменений параметров рабочей зоны, выработанного пространства, месторасположения отвалов и хвостохранилищ, участков проявления геодинамических подвижек, уровня ресурсного потенциала продуктивного пласта, содержания полезного компонента, строения залежи, текстурно-структурных характеристик и технологических свойств полезного ископаемого, гидродинамического режима подземных вод.

Обоснование критерия

С позиций недропользования структура информации по геологическому объекту представляется совокупностью статических и динамических данных. Представление геоданных по совокупности пространственных геопараметров и атрибутивных признаков позволяет обосновать способы разработки месторождения, внутреннюю структуру планируемых геотехнологий, провести оценку фактического и прогнозируемого состояния природно-технологических систем в процессе их функционирования путем анализа изменения ее параметров и показателей (рис. 1). При этом пространственные геоданные оказывают свое влияние через их абсолютные значения (количественная определенность) [13].

К группе пространственных геоданных относятся глубина залегания полезного ископаемого, форма и глубина распространения (оруденения) полезного ископаемого, линейные размеры объекта, число и размер залежей, параметры залегания, естественное напряженно-деформированное состояние горного массива, свойства вмещающих пород, наличие природных флюидов. Вторая группа геоданных включает параметры и показатели, характеризующие морфологию (рудоносность, контакты), внутреннее строение залежей (пластов), текстурно-структурные особенности (минералогический состав, форма минералов и агрегатов, размер вкрапленностей) и физико-механические свойства полезного ископаемого, вторичное напряженно-деформируемым состоянием (НДС) массива, обусловленное исходным (начальным) НДС и техногенными геодинамическими подвижками, возникающими в процессе работы месторождения.

Для сравнительной оценки степени различия изменений природно-техноло-

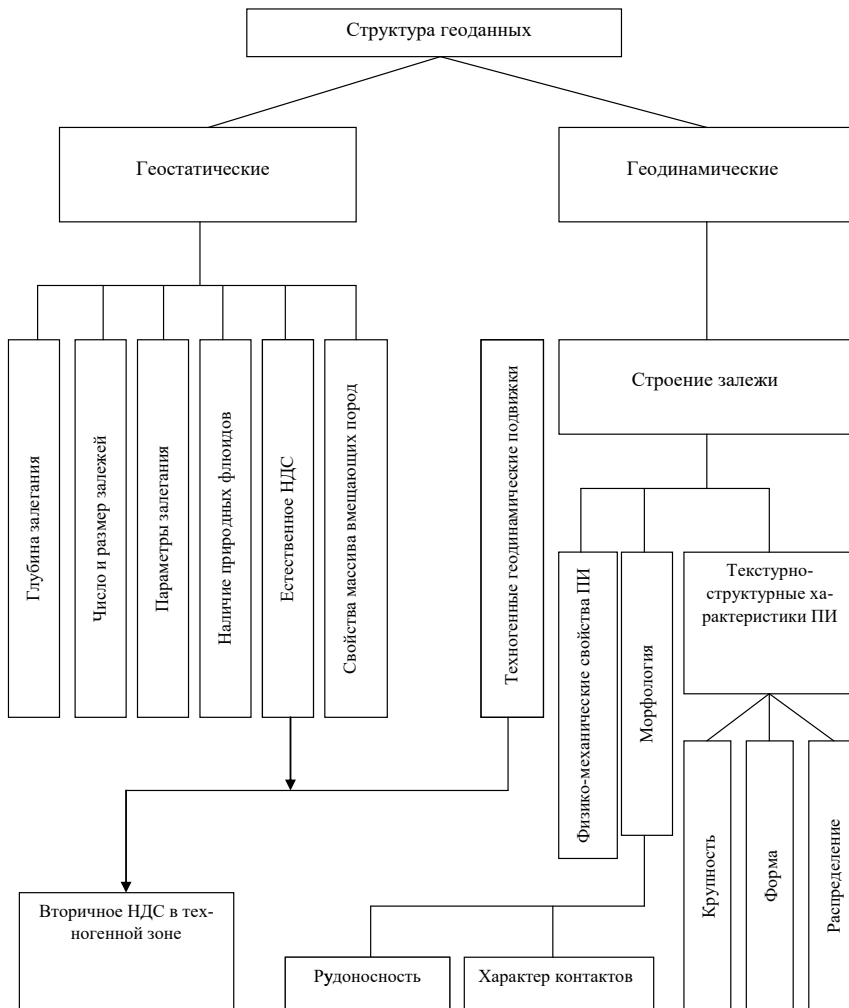


Рис. 1. Структура геоданных для оценки способа разработки и внутренней сущности прогнозируемой технологии

Fig. 1. Geodata structure for evaluating the development method and internal nature of the predicted technology

гической системы целесообразно применить аппарат математической статистики, с использованием относительных показателей вариации [14–17]:

– относительный размах вариации (коэффициент осцилляции)

$$\rho = \frac{R}{\bar{X}}, \quad (1)$$

где \bar{X} – среднее значение параметра

(признака), $\bar{X} = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}$; R – размах вариации (колебаний), $R = X_{\max} - X_{\min}$; X_{\max} , X_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значение параметра (признака)

Линейный коэффициент вариации:

$$V_d = \frac{\bar{d}}{\bar{X}}, \quad (2)$$

где \bar{d} — относительное линейное отклонение:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |X_i - \bar{X}|^2}{n}.$$

Коэффициент вариации:

$$V_s = \frac{S}{\bar{X}}, \quad (3)$$

где S — среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} |X_i - \bar{X}|^2}{n}}.$$

Коэффициент осцилляции характеризует относительную меру колеблемости крайних значений признака вокруг среднего, линейный коэффициент вариации отражает долю усредненного значения абсолютного отклонения от средней величины, коэффициент вариации определяет показатель относительной колеблемости признака в однородной совокупности [15 — 17].

Оценку изменений природно-технологической системы целесообразно осуществлять с использованием коэффициентов осцилляции, отражающих уровень влияния множественных изменений всех учитываемых фактора в пространстве анализируемого объекта. Коэффициент осцилляции характеризует относительную меру изменения (интервал) крайних значений любого признака вокруг их средних величин [13, 15]:

$$\rho = \frac{R}{\bar{X}} = 2(X_{\max} - X_{\min}) / (X_{\max} + X_{\min}), \quad (4)$$

где $R = X_{\max} - X_{\min}$ — интервал изменения признака; \bar{X} — средняя величина по выборке.

С увеличением вариации признака величина показателя, как отмечено выше, изменяется от нуля до двух по гиперболической зависимости,

асимптотически приближаясь к верхнему пределу. В условиях реальных месторождений диапазон колеблемости горно-геологических параметров и показателей, характеризующих продуктивные пласты, залежи, рудные тела, весьма небольшой, в связи с этим коэффициент осцилляции ρ варьирует в пределах значимых изменений [13].

При большом числе количественных оценочных факторов (параметров) предоставляется возможность определить интегральный показатель состояния системы, используя принцип аддитивности (прибавляемости). Для практической реализации данного подхода необходимо выявить и проанализировать интервалы изменения каждого учитываемого показателя и установить весовой коэффициент (значимость) его относительно других. Изменение системы в целом целесообразно оценить комплексным безразмерным аддитивным показателем, представляющим собой сумму учитываемых трансформированных факторов при переходе от исходного к фактическому (прогнозируемому) положению с учетом весовой доли каждого из них:

$$V = \sum_{i=1}^n (\rho_i)_1 \cdot k_i - \sum_{i=1}^n (\rho_i)_2 \cdot k_i = \left[\sum_{i=1}^n (\rho_i)_1 - \sum_{i=1}^n (\rho_i)_2 \right] \cdot k_i, \quad (5)$$

где $(\rho_i)_1$ — значение коэффициента осцилляции i -го параметра в результате антропогенного воздействия на природно-технологическую систему; $(\rho_i)_2$ — значение коэффициента осцилляции i -го параметра в исходном («эталонном») состоянии системы (объекта); k_i — значение весового коэффициента i -го параметра; n — общее число параметров, $i = \bar{1}, n$.

При оценке комплексного безразмерного аддитивного показателя в процентах формула (5) принимает вид

$$V_{\%} = \left[\sum_{i=1}^n (\rho_i)_1 - \sum_{i=1}^n (\rho_i)_2 \right] \cdot k_i \cdot 100.$$

Обсуждение результата

Для сравнительной оценки динамики изменения в различные периоды времени (моменты) необходимо провести сравнительный анализ изменений системы на предыдущих временных промежутках (интервалах). В этом случае вычисляется комплексный безразмерный аддитивный показатель системы, характеризующий изменения на предшествующем этапе (периоде), и сравнить его с фактическим или «эталонным» изменением. При разности показателей $V_{\%}$, не превышающей (4–5)% по сравнению с исходным положением, исходя из принятой допустимой точности проведения маркшейдерских и горно-геометрических расчетов, изменение считается несущественным, и новое состояние системы характеризуется как устойчивое (по отношению к предыдущему состоянию). При отклонениях более чем на 20 % согласно рекомендациям ГКЗ РФ [18, 19], изменения геоданных в горно-технологической системе считаются существенными и требуют пересмотра ранее принятых решений по величине запасов, кондициям и т. п. В этом случае необходимы новые

решения, например, составление новой проектной документации в виде проекта реконструкции, доработки, ликвидации и консервации горных выработок или технического перевооружения (модернизации). При отличии показателей в интервале (5–20) % необходимые направления (варианты), стабилизирующие функционирование природно-технологической системы, обосновываются лицом, принимающим решение.

Заключение

Комплексный безразмерный аддитивный показатель позволяет провести сравнительный анализ динамики изменения природно-технологических систем при недропользовании в различные периоды времени (моменты) и оценить их качественное состояние.

Разработанные методические положения по оценке изменения природно-технологического объекта при недропользовании целесообразно использовать при создании программного обеспечения цифровых двойников, представляющих собой имитационные модели основных горно-технологических процессов (бурение скважин, разрушение скального горного массива, экскавация, управление качеством добываемого сырья).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моисеев Н. Н.* Современный антропогенез и цивилизационные разломы // Зелёный мир. 1994. № 21. С. 5–11.
2. *Jiang Q., Feng X., Song Y., Zehg H., Cui J.* Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects // Acta Mechanica Sinica. 2015. Vol. 32. No 1. Pp. 524 – 535.
3. *Захаров В. Н., Трубецкой К. Н., Панфилов Е. И.* Создание комплекса недропользования — основы правового регулирования горных отношений. М.: Рациональное освоение недр, 2018. № 1.– С. 36 – 43.
4. *Трубецкой К. Н., Мясков А. В., Галченко Ю. П., Еременко В. А.* Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. 2019. — № 5. — С. 6 – 13. DOI: 10.17580/gzh.2019.05.01.

5. *Гвоздев Е. А.* Методология синтеза адаптивной системы комплексной безопасности жизнеобеспечения населения региона // *Пожаровзрывобезопасность.*– 2020. Т. 29. – № 2. –С. 6 – 16. DOI:10.18322/PVB.2020.29.02. 6 – 16.

6 Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования / В. Н. Опарин; ИГД СО РАН. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 288 с.

7. *Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Бурцев Л. И.* Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. М.: Научтехлитиздат. 2003. 262 с.

8. *Трубецкой К. Н.* Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых. М.: ИПКОН, 2014. 196 с.

9. *Сашурин А. Д., Мельник В. В.* Природно-техногенные катастрофы на горных предприятиях: истоки и пути предупреждения // *Проблемы недропользования.* 2020. № 4 (23). С. 37 – 51 с.

10. *Сашурин А. Д.* Современная геодинамика и техногенные катастрофы / *Геомеханика в горном деле: Докл. междунар. конф.* – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2003. С. 180–191.

11. *Сашурин А. Д., Усанов С. В., Мельник В. В., Балек А. Е.* Истоки формирования катастрофических геомеханических процессов на объектах недропользования // *Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сб. докл. V междунар. науч.-техн. конф. (5–13 апреля 2016 г.).* Екатеринбург: УГГУ, 2016. С. 166–172.

12 *Зубков А. В.* Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. 335 с.

13. *Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Сабянин Г. В.* Методология определения сложности структуры рудных месторождений как объектов разработки. ФТПРПИ, 2012. – № 6. – С. 75 – 86.

14. Hakan Elci. Rock mass block quality designation for marble production /*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (vol. 69). Oxford, England. 2014, P.p. 26–30.

15. *Крамер Г.* Математические методы статистики. Пер. с англ. А. С. Моница и А. А. Петрова под ред. Акад. А. Н. Колмогорова. Изд. второе, стереотипное. М.: Изд. «Мир». 1976. 648 с.

16. *Pimentel B. S., Gonzalez E. S., Barbosa G. N. O.* Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. *Journal of Cleaner Production.* 2016 Vol. 112. P.p. 2145–2157.

17. *Espinoza R. D., Rojo J.* Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy.* 2017 Vol. 52. P.p. 7–18.

18. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых (россыпные месторождения). Приложение 41к распоряжению МПР РФ от 05.06.2007 г. № 37-р.

19. Федеральный горный и промышленный надзор России. Постановление от 17.09.1997 г. № 28 об утверждении инструкции «О порядке списания запасов полезных ископаемых с учета предприятий по добыче полезных ископаемых», РД-07 – 203 – 98. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Moiseev N. N. Modern anthropogenesis and civilizational faults. *Zelyonyj mir.* 1994. no. 21. pp. 5–11. [In Russ]

2. Jiang Q., Feng X., Song Y., Zehg H., Cui J. Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects. *Acta Mechanica Sinica.*2015. Vol. 32. no. 1. pp. 524–535.

3. Zaharov V. N., Trubeckoj K. N., Panfilov E. I. *Sozdanie kompleksa nedropol'zovaniya osnovy pravovogo regulirovaniya gornyh otnoshenij* [Creation of a complex of subsurface use-fundamentals of legal regulation of mining relations]. Moscow: Racional'noe osvoenie neдр, 2018. no. 1. pp. 36–43. [In Russ]
4. Trubeckoj K. N., Myaskov A. V., Galchenko Yu. P., Eremenko V. A. Substantiation and creation of convergent mining technologies for underground development of powerful deposits of solid minerals. *Gornyj zhurnal*. 2019. no. 5. pp. 6–13. DOI: 10.17580/gzh.2019.05.01. [In Russ]
5. Gvozdev E. A. Methodology of synthesis of adaptive system of complex life safety of the population of the region. *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2020. T. 29. no. 2. pp. 6–16. DOI:10.18322/PVB.2020.29.02. 6 16. [In Russ]
6. Oparin V. N. *Covremennaya geodinamika massiva gornyh porod verhnej chasti litosfery: istoki, parametry, vozdeystvie na ob'ekty nedropol'zovaniya* [Modern geodynamics of the rock mass of the upper part of the lithosphere: sources, parameters, impact on subsurface objects]. IGD SO RAN. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008. 288 p. [In Russ]
7. Trubeckoj K. N., Galchenko Yu. P., Burcev L. I. *Ekologicheskie problemy osvoeniya neдр pri ustojchivom razvitii prirody i obshchestva* [Ecological problems of subsoil development in the sustainable development of nature and society]. Moscow: Nauchtekhlitizdat. 2003. 262 p. [In Russ]
8. Trubeckoj K. N. *Razvitie resursosberegayushchih i resursovosproizvodyashchih geotekhnologij kompleksnogo osvoeniya mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [Development of resource-saving and resource-reproducing geotechnologies for complex development of mineral deposits]. Moscow: IPKON, 2014. 196 p. [In Russ]
9. Sashurin A. D., Mel'nik V. V. Natural and technogenic disasters at mining enterprises: origins and ways of warning. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2020. no. 4 (23). pp. 37–51. [In Russ]
10. Sashurin A. D. *Sovremennaya geodinamika i tekhnogennye katastrofy* [Modern geodynamics and man-made disasters]. Geomekhanika v gornom dele: Dokl. mezhdunar. konf. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 2003. pp. 180–191. [In Russ]
11. Sashurin A. D., Usanov S. V., Mel'nik V. V., Balek A. E. *Istoki formirovaniya katastroficheskikh geomekhanicheskikh processov na ob'ektah nedropol'zovaniya. Innovacionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnyh i nerudnyh mestorozhdenij* [Sources of formation of catastrophic geomechanical processes at subsurface use objects. Innovative geotechnologies in the development of ore and non-metallic deposits]: sb. dokl. V mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (5–13 aprelya 2016 g.). Ekaterinburg: UGGU, 2016. pp. 166–172. [In Russ]
12. Zubkov A. V. *Geomekhanika i geotekhnologiya* [Geomechanics and Geotechnology]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 2001. 335 p. [In Russ]
13. Trubeckoj K. N., Galchenko Yu. P., Sabyanin G. V. Methodology for determining the complexity of the structure of ore deposits as development objects. *FTPRPI*, 2012. no. 6. pp. 75–86. [In Russ]
14. Hakan Elci. Rock mass block quality designation for marble production /*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (vol. 69). Oxford, England. 2014, pp. 26–30.
15. Kramer G. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods of statistics]. Per. s ang. A. S. Monina i A. A. Petrova pod red. Akad. A. N. Kolmogorova. Izd. vtoroe, stereotipnoe. Moscow: Izd. «Mir». 1976. 648 p. [In Russ]
16. Pimentel B. S., Gonzalez E. S., Barbosa G. N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. *Journal of Cleaner Production*. 2016 Vol. 112. pp. 2145–2157.

17. Espinoza R. D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy*. 2017 Vol. 52. pp. 7–18.

18. *Metodicheskie rekomendacii po primeneniyu Klassifikacii zapasov mestorozhdenij i prognoznyh resursov tverdyh poleznyh iskopaemyh (rossypanye mestorozhdeniya)* [Methodological recommendations for the application of Classification of reserves of deposits and forecast resources of solid minerals (placer deposits)]. Prilozhenie 41k rasporyazheniyu MPR RF ot 05.06.2007. no. 37-r. [In Russ]

19. *Federal'nyj gornyj i promyshlennyj nadzor Rossii. Postanovlenie ot 17.09.1997 g. no. 28 ob utverzhdenii instrukcii «O poryadke spisaniya zapasov poleznyh iskopaemyh s ucheta predpriyatij po dobyche poleznyh iskopaemyh», RD-07–203–98.* [Federal mining and industrial supervision of Russia. Resolution no. 28 of 17.09.1997 on approval of the instruction “on the procedure for writing off mineral reserves from the accounting of mining enterprises”, RD-07–203–98] [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Аленичев Виктор Михайлович — докт. техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, alenichev@igduran.ru, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alenichev V. M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, alenichev@igduran.ru, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg. Russia.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 18.02.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 15.12.2020; received after the review 18.02.2021; accepted for printing 10.04.2021.

