

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ И ПРИЧИНАХ ФЛУКТУАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДИНАМИКИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ СКВАЖИНАХ

В.С. Бригида

Московский политехнический университет, Москва, Россия, e-mail: 1z011@inbox.ru

Аннотация: На сегодняшний день в России отсутствует стандартизированная методика оценки ресурсов шахтного метана, которые пока не доступны для извлечения. В то же время существующие теории лишь частично объясняют динамические колебания состава извлекаемой газовой смеси. Выявлены особенности нелинейной динамики эмиссии метана в процессе добычи угля. Нашел дальнейшее развитие механизм реализации дезинтеграционных процессов в углепородном массиве на основе блочной структуры геосреды и нелинейных геомеханических процессов, описываемых теорией «маятниковых волн». Нелинейный характер изменения в составе аэрогазовой смеси подземных скважин косвенно указывает на наличие нелинейно протекающих в углепородном массиве дезинтеграционных процессов. Методология работы подразумевала проведение анализа литературных источников о нелинейных геомеханических процессах в подрабатываемом массиве, статистической обработки данных о концентрации метана в скважинах типа № 2 на основе LOESS и визуализации данных в gnuplot. Приведены результаты, показывающие, что форма поверхности отклика (динамики метановыделения) «поворачивается» с преобразованием системы координат, при этом границы экстремумов относительно расстояния от начала панели (S) остаются прежними. Это указывает на то, что волновой спектр имеет сложный динамический характер.

Ключевые слова: метан угольных пластов, месторождения угля, угольный пласт, скважина, десорбция, дренаж метана, трехмерные статистические модели, эмиссия.

Для цитирования: Бригида В. С. О возможности оценки и причинах флуктуационной составляющей динамики метановыделения в подземных скважинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 77–86. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_77.

Causes and estimability of fluctuations in methane emission dynamics in underground borehole

V.S. Brigida

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, e-mail: 1z011@inbox.ru

Abstract: Today, Russia has no any standardized procedure for estimating mine methane resources which are yet unrecoverable. At the same time, the existing theories offer only a partial explanation of dynamic fluctuations in the composition of the recoverable methane–air mixture. This research reveals the features of the nonlinear dynamics in methane emission during

coal mining. The mechanism of disintegration processes in coal-and-rock mass is evolved further based on the block structure of the geomedium and nonlinear geomechanical processes described using theory of 'pendulum waves'. The nonlinear change in the composition of gas-air mixture in underground boreholes is indirectly reflective of the nonlinear disintegration processes running in coal-and-rock mass. The methodology of the research included review of literature sources on the nonlinear geomechanical processes in undermined rock mass, statistical processing of data on methane concentrations in No. 2-type boreholes LOESS and visualization of the data in gnuplot. The article describes the results that show that the shape of the response surface (methane emission dynamics) 'turns' with the coordinate system transformation, while the limits of the extreme points relative to the distance from the panel start (S) remain the same. This means that the wave spectrum has a complex dynamic nature.

Key words: coal seam methane, coal field, coal seam, borehole, desorption, methane drainage, three-dimensional statistical models, emission.

For citation: Brigida V. S. Causes and estimability of fluctuations in methane emission dynamics in underground borehole. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):77-86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_77.

Введение

Мониторинг объемов ресурсной базы шахтного метана (недоступного для извлечения) в Российской Федерации существенно затруднен отсутствием нормативных методов его оценки (из-за сложности идентификации степени его извлечения при применении различных способов дегазации). В зависимости от источника информации, уровень запасов метана может составлять: по данным ВНИГРИ-уголь — 51,9 трлн м³, ОАО «Газпром» — 83,7 трлн м³, а по другим данным — до 113 трлн м³ [1–3].

Наиболее перспективными углегазовыми месторождениями являются угольные бассейны, запасы которых могут достигать: 55 млрд м³ — Апсакское месторождение, более 1,3 трлн м³ — Печорский бассейн (Воркута), около 13 трлн м³ Кузнецкий бассейн (Кузбасс); кроме того, к перспективным можно отнести Донбасс [4–6]. Только в Печорском бассейне к 2030 г. ожидается доведение общих объемов добычи до 21 млн т [7, 8]. При этом относительная метанообильность выемочных участков угольных шахт («Заполярная», «Воркутинская» и «Комсомольская») на Воркутин-

ском месторождении может достигать 80 м³/т при среднесуточной добыче 3000 т/сут. Многие исследователи [9, 10] анализировали критерии экономической привлекательности их освоения. В результате ранжирования выявлены перспективные участки Коротайхинской впадины (северо-восточная часть Печорского бассейна) — Янгарейское и Нядинское [9].

О необходимости изменения общих подходов к управлению аэрогазовыми процессами указывает тот факт, что текущая доля объемов утилизированного метана не превышает 40% [4, 11]. Совершенствованию способов обеспечения безопасного режима работы выемочных участков при интенсивной отработке глубокозалегающих газоносных угольных пластов посвящено большое количество работ [12–14], авторами которых установлено: низкий уровень утилизации сдерживается недостаточным уровнем концентрации метана в смеси [15–17]. В то же время оценка пространственно-временной изменчивости состава смеси в скважинах под влиянием геомеханических процессов остается недостаточно изученной [18]. Вследствие

этого устойчивость и надежность работы участков сетей скважин большинства действующих шахт остается на неудовлетворительном уровне. Переход к управлению кровлей частичной закладкой выработанного пространства с использованием в качестве компонентов закладочной смеси отходов обогащения позволяет минимизировать негативное влияние лавы на состояние подземных скважин [19–21]. Тем не менее ряд вопросов остаются нерешенными [22, 23], особенно при использовании карбонизированных закладочных материалов [24].

Таким образом, учет нелинейной динамики газовыделения при пространственно-временном подвигании лавы является актуальной научно-технической задачей для развития технологий отведения метана из дегазируемого массива. В связи с этим целью исследования является выявление методологических основ оценки нелинейного характера флуктуационной составляющей динамики выделения метана в подземных скважинах (а также указание на причины, ее обуславливающие) для последующей разработки перспективных способов подземной дегазации.

Причины нелинейности протекающих в углепородном массиве дезинтеграционных процессов, которые обуславливают волновой характер изменения в составе аэрогазовой смеси подземных скважин

Изменение иерархических уровней и кластеризации геосреды можно объяснить эффектом «квантования» ее структурных элементов, размерность которых определяется следующей зависимостью [25]:

$$\Delta_i = \Delta_0 (\sqrt{2})^i, \quad (1)$$

где i — порядок размерностей (только целые положительные и отрицательные числа); $\Delta_0 = 2,5 \times 10^6$, м.

Согласно современной концепции, изложенной в [25], массив рассматривается как своего рода «блочная» система, а его построение основано на кластеризации и критерии фрактальной геометрии.

Можно утверждать, что система обладает потенциальными условиями для «структурного разделения», которые при такой конфигурации реализуют взаимодействие маятниковых волн, проявляющее характеристики связи.

Существование нелинейных упругих волн маятникового типа — одна из немногих гипотез, объясняющих неоднородный характер деформирования углепородного массива. Теория «маятниковых волн» (предложенная и представительно обоснованная академиками В.В. Адушкиным и В.Н. Опариным) предполагает наличие знакопеременного характера смещений блоковой структуры геосреды в различных направлениях (в том числе и вращательных). По мнению В.В. Адушкина, «в земной коре формируются очаговые зоны концентрации напряжений, способные эволюционировать в акустически активное состояние и переводить накопленную упругую энергию в кинетическую — в виде нелинейных геомеханических квазирезонансов с сопутствующим излучением продольных, поперечных и маятниковых волн».

Результаты работы позволяют раскрыть особенности газодинамических явлений на основе нелинейности геомеханических процессов, заключающиеся в том, что в углегазовых пластах при определенных условиях отработки запасов начинают формироваться импульсы динамических возмущений. Они могут трансформироваться, обуславливая зарождение очагов разрушения контуров выработки и сопровождаясь выделением метана различной степени интенсивности.

**Существующие представления
об особенностях нелинейного
характера газовыделения
из дегазируемой толщи
(двумерная постановка задачи)**

Многие исследователи [26–28] для описания процессов фильтрации и диффузии метана используют обобщенные математические модели. Например, в [26] — такие модели основаны на гиперболическом законе с использованием уравнения параболического вида, описывающего процесс во времени. В работе [28] использовался динамический метод, позволивший повысить качество расчета количества воздуха для проветривания лавы (с учетом конвективно-турбулентной диффузии шахтного метана в выработанном пространстве) и получить более достоверную формулу его расчета:

$$Q_{\text{ов}} = -(0,632 \times I_{\text{ов}}) / (\text{ПДК} - c_{\text{н}}), \quad (2)$$

где $c_{\text{н}}$ — концентрация метана на свежей струе, %; $I_{\text{ов}}$ — абсолютное метановыделение выемочного участка, $\text{м}^3/\text{мин}$.

В большинстве случаев применимость на практике известных полуэмпирических формул можно оценить по соответствию реальным условиям предполагаемого механизма эмиссии метана из совокупности источников его выделения. Наиболее представительной является схема, приведенная в [29]. Авторами указывается, что изменение выделения метана характеризуется периодически колебаниями, обусловленными подработкой вышележащего массива при управлении кровлей полным обрушением. Известно, что обрушения основной и непосредственной кровли возникают с определенной периодичностью во времени, что определяет соответствующий характер («общую цикличность») объемов газовыделения на участке [29]. Исходя из схемы сдвижения вышележащей толщи пород, представленной в [27],

можно утверждать, что перемещение горных пород по напластованию и заполнение выработанного пространства способствуют резкому всплеску эмиссии метана. Динамическое воздействие при этом может распространяться в области 250 м вокруг очистного забоя. По мнению автора, сложности в описании взаимосвязи геомеханического фактора и газодинамических процессов (вследствие имеющих место циклических обрушений пород кровли в выработанном пространстве), а также нестабильность подвигания забоя лавы не позволяют достоверно прогнозировать метанообильность выемочного участка. В связи с этим качественно новые результаты, которые представлены в работе [30], получены для условий ш. «Котинская» (СУЭК). Из анализа результатов данной работы следует, что в динамике метановыделения для лав №№ 5208, 5209 и 5210 присутствуют периодически сменяющиеся локальные максимумы и минимумы.

Увеличение длины лавы и снижение скорости подвигания при постоянных объемах добычи приведет к сглаживанию данной неравномерности и лучшей управляемости аэрогазовым режимом. Для более детального анализа исследуемого процесса следует из общего метановыделения (концентрации) выделить долю отдельных скважин, по образцу работы [31]. Из анализа результатов данной работы следует, что в большинстве случаев прослеживается не просто неравномерность, а общность нелинейности протекания исследуемого процесса. При этом амплитуды волн меняются (нарастают) со временем, или в 40–55 м до линии очистного забоя (в зоне опорного давления). Существенную долю неопределенности вносит влияние неравномерности подвигания лавы. В работе [32] природа цикличности газовыделения объясняется изменяющейся

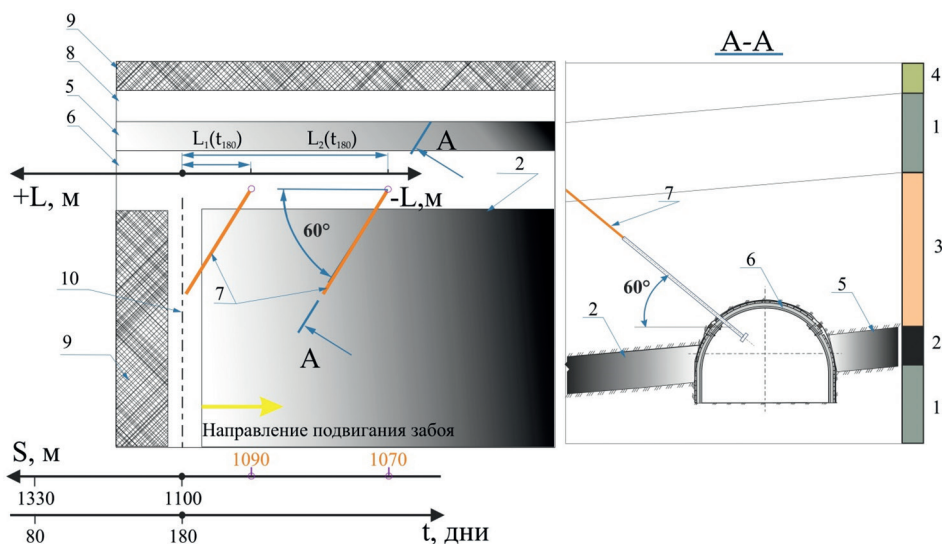
массой отбитого угля, исходя из результатов концентрации метана в исходящей струе лав ш. «Котинская». Из графиков, отражающих влияние выемки двух «лент» угля, следует, что нарастание концентрации метана сопряжено с ростом протяженности скребкового конвейера и объемами отбитого угля. С одной стороны, в качестве главного может быть технологический фактор, с другой, — возможность «потери» и последующего выноса на исходящую струю до 13% расхода воздуха (обогащенного метаном из выработанного пространства).

Из современных представлений о теории подземной дегазации можно утверждать, что не все проявления нелинейности газовыделения можно объяснить флуктуациями, вызванными неравномерностью скорости подвигания или другими технологическими или горно-геологическими особенностями отработки газоносных пластов (например:

особенностями распределения изогаз). В подобных исследованиях данный факт объясняется гипотезой диссоциации гидратов метана с образованиями «газовых карманов» при зависании породных консолей [33]. Это доказывает волновую природу десорбции шахтного метана вследствие реализации нелинейных изменений напряженно-деформированного состояния вмещающего массива горных пород при подвигании линии очистного забоя относительно начала выемочного участка.

Оценка нелинейных особенностей выделения шахтного метана (трехмерная постановка задачи)

В рамках данного исследования формировались две трехмерные регрессионные модели для имеющихся данных по пласту m3 шахты им. А.Ф. Засядько (рис. 1), отражающие динамику метановыделения из скважин типа № 2 (рис. 2)



1 — алевролит темно-серый; 2 — пласт m3; 3 — аргиллит; 4 — песчаник; 5 — целик угля; 6 — вентиляционный штрек; 7 — ствол скважины; 8 — конвейерный штрек ранее отработанной лавы; 9 — выработанное пространство; 10 — линия очистного забоя лавы; S — расстояние до начала участка, м; t — время от начала отработки запасов, дней; L — расстояние до лавы

Рис. 1. Схема расположения подземных скважин при дегазации исследуемой лавы

Fig. 1. Layout of underground wells and development of reserves in the extraction area using reverse mining

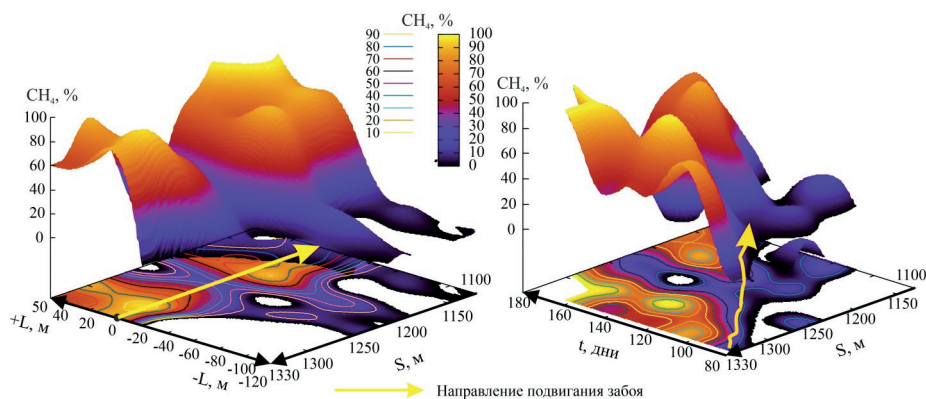


Рис. 2. Графические отображения пространственно-временной изменчивости динамики метановыделения на выемочном участке

Fig. 2. Visualization of spatiotemporal variability of methane emission dynamics at a extraction panel

«по времени» отработки панели и «от расстояния до лавы» в каждый момент времени [31].

Из анализа схемы, представленной на рис. 1, следует, что при отработке лавы «обратным ходом» (т.е. от границ панели к началу выемочного участка — так называемая «столбовая система разработки») возникает ситуация, когда расстояние от начала участка (пикеты, S) уменьшается с ростом времени отработки запасов (t). Кроме того, при замене одного из измерений (t на L), при статистической обработке тех же самых данных, направление оси лавы будет меняться, трансформируя поверхность функции отклика.

Из анализа динамики метановыделения, представленной проекциями двух трехмерных моделей на рис. 2, следует, что при варианте справа ($CH_4 = f(t; S)$) проекция линии подвигания очистного забоя расположена под углом к осям X и Y . В то же время при варианте слева $CH_4 = f(L; S)$ — расположена параллельно к оси X (S). Это сопровождается «разворотом» локальных экстремумов функций отклика (максимумов динамики концентрации метана в смеси), при этом их граничные значения S остаются прежними.

Заключение

В исследовании представлен вариант объяснения причин нелинейности протекающих в углепородном массиве дезинтеграционных процессов, которые обуславливают волновой характер изменения в составе аэрогазовой смеси подземных скважин. Обосновывается отсутствие стандартизированных методик оценки запасов трудноизвлекаемых природных газов в процессе совместной добычи угля и газа на угольных шахтах России. На основе фактических данных автором сформированы две трехмерные регрессионные модели, позволяющие оценить параметры локальных максимумов и минимумов изменения концентрации метана во времени и пространстве (расстояние от забоя). Изменяемые в пространстве и времени положения таких экстремумов позволяет прогнозировать флуктуационную (нелинейную) составляющую динамики метановыделения, что косвенно доказывает наличие подобно протекающих геомеханических процессов в подрабатываемом массиве горных пород (например, маятниковых волн).

В исследовании доказано, что локальные экстремальные значения поверхности функции отклика «поворачиваются»

с преобразованием системы координат, обуславливая нелинейную составляющую при преобразовании газозольного раствора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макарова Е. Ю., Митронов Д. В. Ресурсная база и перспективы добычи метана угольных пластов в России // Георесурсы. — 2015. — № 2(61). — С. 101–105. DOI: 10.18599/grs.61.2.9.
2. Sidorenko S., Trushnikov V., Sidorenko A. Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams // Sustainability (Switzerland). 2024, vol. 16, no. 8. DOI: 10.3390/su16083457.
3. Ключев Р. В. Циркулярное управление шахтным метаном при энергоснабжении буровых установок // Уголь. — 2025. — № 2. — С. 106–109. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-2-106-109.
4. Юрова М. П. Перспективы и возможности использования угольного метана как нетрадиционного источника энергии // Георесурсы. — 2016. — Т. 18. — № 4. — Ч. 2. — С. 319–324. DOI: 10.18599/grs.18.4.10.
5. Khayrutdinov M. M., Ma L. Q., Mangi H. N., Kongar-Syuryun Ch. B., Klyuev R. V., Petenko A., Brigida V. Ensuring decarbonization underground construction technologies of backfilling based on the tailings // Construction Materials and Products. 2026, vol. 9, no. 3. DOI: 10.58224/2618-7183-2026-9-3-7.
6. Slautunov S., Kolikov K., Batugin A., Sadov A., Khautiev A. Improvement of intensive in-seam gas drainage technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin // Energies. 2022, vol. 15, no. 3. DOI: 10.3390/en15031047.
7. Кислицын М. С., Ярошенко В. В. Анализ возможностей управления газовойделением при отработке угольных пластов Воркутского месторождения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2015. — № 2. — С. 20–25.
8. Portnov V., Mindubayev A., Golik A., Suleimenov N., Zakharov A., Madisheva R., Kolikov K., Imanbaeva S. Risk assessment of sudden coal and gas outbursts based on 3D modeling of coal seams and integration of gas-dynamic and tectonic parameters // Fire. 2025, vol. 8, no. 6. DOI: 10.3390/fire8060234.
9. Митронов Д. В., Макарова Е. Ю., Ступакова А. В., Богомолов А. Х., Кузеванова Е. В. Возможность освоения метаноугольных месторождений Коротаихинской впадины Печорского бассейна // Георесурсы. — 2017. — Спецвыпуск. — Ч. 1. — С. 102–111. DOI: 10.18599/grs.19.11.
10. Сластунов С. В., Ютяев Е. П., Мазаник Е. В., Садов А. П., Понизов А. В. Обеспечение метанобезопасности шахт на основе глубокой дегазации угольных пластов при их подготовке к интенсивной разработке // Уголь. — 2019. — № 7. — С. 42–47. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-42-47.
11. Василенко Т. А., Кириллов А. К., Вильнер М. А., Мешков А. А., Галсанов Н. Л. Оценка изменения проницаемости угольного пласта в зонах тектонических нарушений и геодинамически активных зонах // Горный журнал. — 2025. — № 11. — С. 72–79. DOI: 10.17580/gzh.2025.11.10.
12. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines // Eurasian Mining. — 2015. — № 2. DOI: 10.17580/em.2015.02.01.
13. Каледина Н. О., Малашкина В. А. Индикаторная оценка надежности функционирования шахтных вентиляционно-дегазационных систем // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 553–561. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.
14. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю., Рыбичев А. А. Методология интегрированного управления аэрологическими рисками в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 123–134. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-123-134.
15. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Управление геотехническими рисками в шахтном и подземном строительстве // Устойчивое развитие горных территорий. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 556–563. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-556-563.
16. Каледина Н. О., Мещеряков Д. А., Малашкина В. А. Выделение метана из почвы как фактор формирования местных скоплений в очистных забоях угольных шахт // Безопасность труда в промышленности. — 2026. — № 2. — С. 29–36. DOI: 10.24000/0409-2961-2026-2-29-36.
17. Sladkovsky D., Semikin K., Nizovtseva I., Romanovski V., Khvashchevskaya Y., Popkov V. Organized fluidized bed reactor design for methane oxidative coupling: Maximizing efficiency and se-

lectivity through advanced hydrodynamics // Engineering Reports. 2026, vol. 8, no. 7. DOI: 10.1002/eng2.70952.

18. Маневич А. И., Коликов К. С., Ледяев Н. В., Лосев И. В., Акматов Д. Ж., Шевчук Р. В. Сравнительный анализ моделей зависимости фильтрационных свойств угля от напряженно-деформированного состояния массива // Горные науки и технологии. — 2026. — Т. 11. — № 1. — С. 35 — 45. DOI: 10.17073/2500-0632-2025-08-1015.

19. Босиков И. И., Ключев Р. В., Силаев И. В., Верисокин А. Е. Математическое моделирование надежности вентиляционных систем шахт на основе интегро-дифференциальных уравнений с учетом дополнительной инвариантности // Горные науки и технологии. — 2026. — Т. 11. — № 2. — С. 151 — 158. DOI: 10.17073/2500-0632-2026-05-1174.

20. Golik V. I., Dmitrak Y. V., Brigda V. S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020, vol. 5, pp. 47 — 54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.

21. Cao G., Ma L., Liu W., Khan N. M., Osemudiamhen A. E., Gao Q., Yu, K., Guo Z., Li S., Yang R., Yang X. Characteristics of infrared radiation precursors of water inrush from coal and rock fractures under hydrodynamic coupling // Infrared Physics & Technology. 2025, vol. 151, article 106143. DOI: 10.1016/j.infrared.2025.106143.

22. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Рыбичев А. А. Управление гидрогеологическими рисками при ведении горных и строительных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2026. — Т. 18. — № 2. — С. 748 — 755. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-2-748-755.

23. Romanovski V., Moskovskikh D., Tan H., Kuskov K., Volodko S., Akinwande A. A., Periakuruppan R., Kong F., Ma X., Yang F., Kamarou M. Gypsum binder with increased water resistance derived from membrane water desalination waste // Engineering Reports. 2024, vol. 7, no. 1. DOI: 10.1002/eng2.13028.

24. Mangi H. N., Ma L., Sajib M. H., DeTian Y., Ahmad Q. A., Ngo I., Yang, X. CO₂ carbonation process of cemented paste backfill material using polycarboxylate ether (PCE) and MgCl₂ // Results in Engineering. 2025, vol. 28, article 107742. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107742.

25. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 10 — 37.

26. Kachurin N. M., Vorobev S. A., Vasilev P. V. Generalized mathematical model for gases filtration in coal beds and enclosing strata // Eurasian Mining. — 2015. — № 2. DOI: 10.17580/em.2015.02.10.

27. Шубина Е. А., Лукьянов В. Г. Проблемные вопросы расчета газовыделения в выемочный участок с учетом геомеханических и газодинамических процессов и методы их решения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2015. — Т. 326. — № 3. — С. 13 — 18.

28. Стась Г. В., Качурин Н. М., Голик В. И., Стась В. П. Аэрогазодинамические процессы в горных выработках и обеспечение аэрологической безопасности при подземной добыче полезных ископаемых // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — № 4. — С. 338 — 352.

29. Odintsev V. N., Makarov V. V. Dynamic fracture of gas-bearing coal seam during zonal disintegration. Journal of Mining Science. 2020, vol. 56, no. 6, pp. 932 — 946. DOI: 10.1134/S106273912006006X.

30. Пак Г. А., Дрижд Н. А., Долгонос В. Н. Взаимосвязь обрушений основной кровли с газодинамическими явлениями на угольных шахтах // Уголь. — 2014. — № 1. — С. 56 — 58.

31. Sidorenko A. A., Sirenko Yu. G., Sidorenko S. A. Influence of face advance rate on geomechanical and gas-dynamic processes in longwalls in gassy mines // Eurasian Mining. — 2018. — № 1, pp. 3 — 8. DOI: 10.17580/em.2018.01.01.

32. Ордин А. А., Тимошенко А. М., Коленчук С. А. Циклические закономерности метановыделения в длинном очистном забое шахты // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 131 — 141.

33. Бригида В. С., Джигоева А. К. Определение шага возведения искусственных полос частичной закладки для снижения эмиссии климатически активных газов // Уголь. — 2024. — № 4. — С. 74 — 78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-74-78.

34. Полевщиков Г. Я. «Деформационно-волновые» процессы в массиве горных пород при движении очистного забоя в угольных пластах // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 50 — 61. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Makarova E. Yu., Mitronov D. V. Resource base and prospects for coal bed methane production in Russia. *Georesursy*. 2015, no. 2(61), pp. 101 – 105. [In Russ]. DOI: 10.18599/grs.61.2.9.
2. Sidorenko S., Trushnikov V., Sidorenko A. Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams. *Sustainability (Switzerland)*. 2024, vol. 16, no. 8. DOI: 10.3390/su16083457.
3. Klyuev R. V. Circular mine methane management for power supply of drilling rigs. *Ugol'*. 2025, no. 2, pp. 106 – 109. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-2-106-109.
4. Yurova M. P. The Prospects and Opportunities to Use Coal Bed Methane as Unconventional Energy Source. *Georesursy*. 2016, vol. 18, no. 4, part 2, pp. 319 – 324. [In Russ]. DOI: 10.18599/grs.18.4.10.
5. Khayrutdinov M. M., Ma L. Q., Mangi H. N., Kongar-Syuryun Ch. B., Klyuev R. V., Petenko A., Brigida V. Ensuring decarbonization underground construction technologies of backfilling based on the tailings. *Construction Materials and Products*. 2026, vol. 9, no. 3. DOI: 10.58224/2618-7183-2026-9-3-7.
6. Slastunov S., Kolikov K., Batugin A., Sadov A., Khautiev A. Improvement of intensive in-seam gas drainage technology at Kirova Mine in Kuznetsk Coal Basin. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 3. DOI: 10.3390/en15031047.
7. Kislytsyn M. S., Yaroshenko V. V. Analyzing possibilities of gas emission control during coal seams mining of Vorkutskoye deposit. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2015, no. 2, pp. 20 – 25. [In Russ].
8. Portnov V., Mindubayev A., Golik A., Suleimenov N., Zakharov A., Madisheva R., Kolikov K., Imanbaeva S. Risk assessment of sudden coal and gas outbursts based on 3D modeling of coal seams and integration of gas-dynamic and tectonic parameters. *Fire*. 2025, vol. 8, no. 6. DOI: 10.3390/fire8060234.
9. Mitronov D. V., Makarova E. Yu., Stoupakova A. V., Bogomolov A. Kh., Kuzevanova E. V. The possibility of developing methane-coal deposits in the Korotai Kha depression of the Pechora basin. *Georesursy*. 2017. (Special edition), part 1, pp. 102 – 111. [In Russ]. DOI: 10.18599/grs.19.11.
10. Slastunov S. V., Yutyaev E. P., Mazanik E. V., Sadov A. P., Ponizov A. V. Ensuring methane safety of mines on the basis of deep degassing of coal seams in their preparation for intensive development. *Ugol'*. 2019, no. 7, pp. 42 – 47. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-42-47.
11. Vasilenko T. A., Kirillov A. K., Vilner M. A., Meshkov A. A., Galsanov N. L. Change in permeability of coal seams in faulted and geodynamically active zones. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 11, pp. 72 – 79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.11.10.
12. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines. *Eurasian Mining*. 2015, no. 2. DOI: 10.17580/em.2015.02.01.
13. Kaledina N. O., Malashkina V. A. Indicator assessment of the reliability of mine ventilation and degassing systems functioning. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 553 – 561. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.
14. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu., Rybichev A. A. Methodology of integrated control of aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026, vol. 18, no. 1, pp. 123 – 134. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-123-134.
15. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geotechnical risk management in mine and underground construction. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025, vol. 17, no. 1, pp. 556 – 563. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-556-563.
16. Kaledina N. O., Meshcheryakov D. A., Malashkina V. A. Methane release from the soil as a factor of the formation of local accumulations in treatment faces of coal mines. *Occupational Safety in Industry*. 2026, no. 2, pp. 29 – 36. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2026-2-29-36.
17. Sladkovsky D., Semikin K., Nizovtseva I., Romanovski V., Khvashchevskaya Y., Popkov V. Organized fluidized bed reactor design for methane oxidative coupling: Maximizing efficiency and selectivity through advanced hydrodynamics. *Engineering Reports*. 2026, vol. 8, no. 7. DOI: 10.1002/eng2.70952.
18. Manevich A. I., Kolikov K. S., Ledyayev N. V., Losev I. V., Akmatov D. Z., Shevchuk R. V. Comparative analysis of coal permeability models accounting for the stress-strain state of the rock mass. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026, vol. 11, no. 1, pp. 35 – 45. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2025-08-1015.
19. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Silaev I. V., Verisokin A. E. Mathematical modeling of the reliability of mine ventilation systems using integro-differential equations with additional invariance. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2026, vol. 11, no. 2, pp. 151 – 158. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2026-05-1174.

20. Golik V. I., Dmitrak Y. V., Brigda V. S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020, vol. 5, pp. 47 – 54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.

21. Cao G., Ma L., Liu W., Khan N. M., Osemudiamhen A. E., Gao Q., Yu, K., Guo Z., Li S., Yang R., Yang X. Characteristics of infrared radiation precursors of water inrush from coal and rock fractures under hydrodynamic coupling. *Infrared Physics & Technology*. 2025, vol. 151, article 106143. DOI: 10.1016/j.infrared.2025.106143.

22. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Rybichev A. A. Hidrogeological risk control during mining and construction operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026, vol. 18, no. 2, pp. 748 – 755. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-2-748-755.

23. Romanovski V., Moskovskikh D., Tan H., Kuskov K., Volodko S., Akinwande A. A., Periakaruppan R., Kong F., Ma X., Yang F., Kamarou M. Gypsum binder with increased water resistance derived from membrane water desalination waste. *Engineering Reports*. 2024, vol. 7, no. 1. DOI: 10.1002/eng2.13028.

24. Mangi H. N., Ma L., Sajib M. H., DeTian Y., Ahmad Q. A., Ngo I., Yang, X. CO₂ carbonation process of cemented paste backfill material using polycarboxylate ether (PCE) and MgCl₂. *Results in Engineering*. 2025, vol. 28, article 107742. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107742.

25. Adushkin V. V., Oparin V. N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomedias. Part III. *Journal of Mining Sciences*. 2014, no. 4, pp. 10 – 37. [In Russ].

26. Kachurin N. M., Vorobev S. A., Vasilev P. V. Generalized mathematical model for gases filtration in coal beds and enclosing strata. *Eurasian Mining*. 2015, no. 2. DOI: 10.17580/em.2015.02.10.

27. Shubina E. A., Lukyanov V. G. Problems in calculating gas-make in the operating panels in view of geomechanical, and gas-dynamic processes, and methods to resolve them. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 3, pp. 13 – 18. [In Russ].

28. Stas G. V., Kachurin N. M., Golik V. I., Stas V. P. Aerogasdynamic processes in mining workings and providing aerological safety by underground mining minerals. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2018, no. 4, pp. 338 – 352. [In Russ].

29. Odintsev V. N., Makarov V. V. Dynamic fracture of gas-bearing coal seam during zonal disintegration. *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 56, no. 6, pp. 932 – 946. DOI: 10.1134/S106273912006006X.

30. Pak G. A., Drizhd N. A., Dolgonosov V. N. Main roof breakdown – gas-dynamic phenomena relation in coal mines. *Ugol'*. 2014, no. 1, pp. 56 – 58. [In Russ].

31. Sidorenko A. A., Sirenko Yu. G., Sidorenko S. A. Influence of face advance rate on geomechanical and gas-dynamic processes in longwalls in gassy mines. *Eurasian Mining*. 2018, no. 1, pp. 3 – 8. DOI: 10.17580/em.2018.01.01.

32. Ordin A. A., Timoshenko A. M., Metel'kov A. A., Kolenchuk S. A. Cyclical behavior of methane emissions in a longwall. *Journal of Mining Sciences*. 2016, no. 4, pp. 131 – 141. [In Russ].

33. Brigida V. S., Dzhioeva A. K. Determination of construction step to artificial strips of backfilling fore reduce the emission of climatically active gases. *Ugol'*. 2024, no. 4, pp. 74 – 78. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-74-78.

34. Polevshchikov G. Ya. Deformation-wave processes under production face advance in coal and rocks. *Journal of Mining Sciences*. 2013, no. 5, pp. 50 – 61. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бригида Владимир Сергеевич — канд. техн. наук, доцент,
Центр проектной деятельности, Московский политехнический университет,
e-mail: 1z011@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0002-9421-5613.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

V.S. Brigida, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Center for Project Activities,
Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia,
e-mail: 1z011@inbox.ru, ORCID ID: 0000-0002-9421-5613.

Получена редакцией 14.07.2026; получена после рецензии 26.08.2026; принята к печати 20.09.2026.
Received by the editors 14.07.2026; received after the review 26.08.2026; accepted for printing 20.09.2026.